

複雑な曲面や突起形状を有する構造物への高精度解析モデル生成技術

(High-precision analysis model generation technique for structures
with complicated curved surfaces and protrusion shapes)

2020年3月

埼玉大学大学院理工学研究科（博士後期課程）

理工学専攻 人間支援・生産科学コース（主指導教員 綿貫 啓一）

小野寺 誠

要旨

自動車や電機など製造業においては、CAE(Computer Aided Engineering)を用いて試作の一部を代替し、短時間で信頼性の高い製品を提供する取組みを行っている。ここで課題となるのが解析モデルの作成であり、経験やノウハウに基づくなど属人性が高く、また、解析精度を保証するためにメッシュ品質の仕様が部位毎に細かく規定されておりメッシュ作成工数が膨大になることが課題となっている。本研究では、実績のある過去の解析データに着目し、過去のCAD(Computer Aided Design)データとメッシュデータをデータベース化し、新設計形状の解析モデルに再利用することで、過去データと同水準の高品質解析モデルを自動生成する技術を開発した。解析モデルの作成工数を削減するとともに、メッシュ品質の標準化を実現できる。これまでに自動車部品やバイク部品、鉄道車両部品などに適用し、解析モデル作成工数を30%以上削減できることを確認している。

第1章では、従来技術の問題点を整理し、本研究の目的を示している。

第2章では、本研究による課題解決のアプローチ、および解決手段の全体概要を示している。本研究においては、新設計のCADデータと過去のCADデータを比較し、再利用可能な部分形状を検索する類似部分形状検索技術、厚みのあるソリッドモデルから解析用の厚みのない板構造である中立面を生成する解析用中立面自動生成技術、既存のメッシュを変形させて新設計形状のメッシュを作成できるメッシュモーフィング技術、の3つのコア技術から構成される。

第3章では、開発した技術およびシステムの構成を示している。また、再利用するCADデータとメッシュデータのデータベースの構成についても説明している。

第4章では、再利用可能な部分形状を検索する類似部分形状検索技術の詳細を示している。自動車ドアスイッチカバー部品に適用し、部品間の嵌め合い形状であるスナップフィット構造やボス構造、補強のためのリブ構造に対して、寸法が異なったり、フィレット有無の違いなどを、類似度として定量化し、再利用可能な部分形状を検索できることを確認している。

第5章では、厚みのあるソリッド部品から解析用の厚みのない板構造である中立面を生成する解析用中立面自動生成技術の詳細を示している。自動車のボディー形状（外板やバンパー、ドアパネルなど）ように大規模な薄板構造物をソリッドモデルで解析することは、解析規模が大きくなるので実用的ではない。一般的に中立面や梁で代表したシェルモデルや梁モデルを用いて解析する。鉄道車両部品などに開発した技術を適用し、この有効性を確認している。

第6章では、既存のメッシュを変形させて新設計形状のメッシュを作成できるメッシュモーフィング技術の詳細を示している。メッシュを変形させる手法としては、面間の距離や円筒面の径などの寸法に基づいてメッシュをパラメトリックに変形するパラメトリックメッシュモーフィング、リブやボスなどのフィーチャの追加や削除を行えるフィーチャ追加削除モーフィング、メッシュに対して制御領域、変形領域、固定領域を指定して変形するフリーフォームモーフィング、指定された変形後形状にメッシュをフィッティングさせるフィッティングモーフィング、の4つの手法を開発

した。さらには、メッシュモーフィング後にゆがみの大きくなったメッシュの品質を改善するメッシュモーフィング対応品質改善技術も開発した。自動車部品に適用し、この有効性を確認している。

第7章では、これら一連の技術を活用し、自動車ドアスイッチカバー部品の高品質メッシュを作成したプロセスと結果および考察を示している。

第8章では、各章で得られた結論および成果を要約している。

最後に第9章では、開発技術の応用展開について示している。

目次

1. 緒 論	8
1.1 研究の背景	8
1.2 従来技術の課題	8
1.3 本研究の目的	10
2. 本研究のコンセプト	11
2.1 課題解決アプローチ	11
2.2 解決手段の概要	11
3. システム全体構成とノウハウ DB	14
4. 類似部分形状検索技術	15
4.1 従来の形状検索技術の課題	15
4.2 解決手段の概要	15
4.3 グラフモデル	16
4.4 幾何類似度の計算	17
4.5 類似部分形状候補の探索	18
4.6 位相類似度の計算	20
4.7 部分形状類似度の計算	22
4.8 類似部分形状検索技術の検証	23
5. 中立面自動生成技術	27
5.1 従来技術の課題	27
5.2 中立面自動生成の概略手順	27
5.3 薄板対向面の認識	30
5.4 端部面と段差面の認識	32
5.5 リブ面の認識	32
5.6 対向面グループの認識	34
5.7 オフセット面生成	35
5.8 リブ面の延長	36
5.9 板厚寸法の設定	38
5.10 中立面モデルの形状制御	39
5.11 中立面生成技術の検証	40
6. メッシュモーフィング技術	43
6.1 メッシュモーフィング技術の課題	43
6.2 解決手段の概要	44

6.3	幾何特徴認識	45
6.4	パラメトリックメッシュモーフィング	52
6.5	フィーチャ追加削除モーフィング	58
6.6	フィッティングモーフィング	65
6.7	モーフィング後の要素品質改善	72
7.	適用と検証	85
8.	結 論	88
8.1	全体的な成果	88
8.2	類似部分形状検索技術に関する成果	89
8.3	解析用中立面自動生成技術に関する成果	89
8.4	メッシュモーフィング技術に関する成果	89
8.5	今後の展開	90
9.	開発技術の応用展開と展望	90
9.1	概 要	90
9.2	標準機能ライブラリ	92
9.3	デジタライズドルール	95
9.4	設計ルールの実装事例	96
9.5	今後の展望	99

图目次

<i>Fig. 1-1 CAD and mesh of snap-fit part. Snap-fit has no strict medial surface. In practice, it is necessary to create a mesh representing the contact surface as shown in (b).</i>	9
<i>Fig. 2-1 High-precision analysis model generation technique for structures with complicated curved surfaces and protrusion shapes.</i>	13
<i>Fig. 3-1 Overview of system configuration.</i>	14
<i>Fig. 4-1 Procedure of similar sub-part search.</i>	16
<i>Fig. 4-2 3D-CAD models and graphs. The graphs consist of the nodes representing the surfaces and the connections representing the edges that adjacent two surfaces.</i>	17
<i>Fig. 4-3 Example of specifying search candidates.</i>	19
<i>Fig. 4-4 Example models for evaluation.</i>	24
<i>Fig. 4-5 Example of a dissimilar sub-part.</i>	26
<i>Fig. 5-1 Example of medial-surface shape in step structure.</i>	27
<i>Fig. 5-2 Procedure of medial-surface generation.</i>	29
<i>Fig. 5-3 Medial-surface model generation process.</i>	30
<i>Fig. 5-4 Recognition of pair faces.</i>	31
<i>Fig. 5-5 Recognition of side faces and connection faces.</i>	32
<i>Fig. 5-6 Recognition of rib faces.</i>	34
<i>Fig. 5-7 Selection of offset side.</i>	36
<i>Fig. 5-8 Extension of rib faces.</i>	38
<i>Fig. 5-9 Control of medial-surface model shape.</i>	40
<i>Fig. 5-10 Example of a bracket model.</i>	41
<i>Fig. 5-11 Example of a cellular phone cover model.</i>	42
<i>Fig. 6-1 Mesh morphing preserves original geometric features.</i>	44
<i>Fig. 6-2 Developed mesh morphing technique.</i>	45
<i>Fig. 6-3 Examining parameters for selecting the seed node.</i>	47
<i>Fig. 6-4 Maximum distance between geometric feature and triangle.</i>	47
<i>Fig. 6-5 Process flow chart for geometric feature identification.</i>	50
<i>Fig. 6-6 Geometric feature identification process.</i>	51
<i>Fig. 6-7 Flowchart of geometric feature calculation process.</i>	54
<i>Fig. 6-8 Parametric morphing process applied to geometric-features.</i>	55
<i>Fig. 6-9 Parametric mesh-morphing process.</i>	56
<i>Fig. 6-10 Application result for bracket part.</i>	57
<i>Fig. 6-11 Application result for bracket part for connecting-rod part.</i>	58
<i>Fig. 6-12 Configuration of morphing technique for adding and deleting features.</i>	59
<i>Fig. 6-13 Feature addition morphing process.</i>	59
<i>Fig. 6-14 Feature deletion morphing process.</i>	59
<i>Fig. 6-15 Additional feature parameters.</i>	61
<i>Fig. 6-16 Quality improvement of triangle mesh.</i>	62

<i>Fig. 6-17</i>	<i>Procedure of mesh set operation.</i>	<i>63</i>
<i>Fig. 6-18</i>	<i>Example of adding ribs to the engine block partial model.</i>	<i>64</i>
<i>Fig. 6-19</i>	<i>Example of deleting ribs to the engine block partial model.</i>	<i>65</i>
<i>Fig. 6-20</i>	<i>Shape feature association procedure.</i>	<i>67</i>
<i>Fig. 6-21</i>	<i>Node fitting procedure.</i>	<i>68</i>
<i>Fig. 6-22</i>	<i>Example of c_1 factor.</i>	<i>70</i>
<i>Fig. 6-23</i>	<i>Application for a piston head model.</i>	<i>71</i>
<i>Fig. 6-24</i>	<i>Application for a gear model</i>	<i>72</i>
<i>Fig. 6-25</i>	<i>Example of element quality deterioration due to mesh morphing (1).</i>	<i>74</i>
<i>Fig. 6-26</i>	<i>Example of element quality deterioration due to mesh morphing (2).</i>	<i>74</i>
<i>Fig. 6-27</i>	<i>Configuration diagram of element quality improvement technique for mesh morphing.</i>	<i>76</i>
<i>Fig. 6-28</i>	<i>Distribution chart of objective mesh quality.</i>	<i>77</i>
<i>Fig. 6-29</i>	<i>Deletion of poor quality elements and the neighboring elements.</i>	<i>78</i>
<i>Fig. 6-30</i>	<i>Improvement of outer triangle.</i>	<i>79</i>
<i>Fig. 6-31</i>	<i>Improvement of outer triangle process.</i>	<i>80</i>
<i>Fig. 6-32</i>	<i>Generation of inner elements.</i>	<i>81</i>
<i>Fig. 6-33</i>	<i>Procedure of "Advancing Front Method".</i>	<i>82</i>
<i>Fig. 6-34</i>	<i>Example of improved mesh for bracket model.</i>	<i>84</i>
<i>Fig. 6-35</i>	<i>Example of improved mesh for oil pump housing model.</i>	<i>85</i>
<i>Fig. 7-1</i>	<i>Application result to automotive door switch panel cover parts.</i>	<i>87</i>
<i>Fig. 7-2</i>	<i>Example of partial shape with low similarity.</i>	<i>87</i>
<i>Fig. 9-1</i>	<i>Example of partial shape with low similarity.</i>	<i>91</i>
<i>Fig. 9-2</i>	<i>Briefing chart of "Design Insight CAD System".</i>	<i>92</i>
<i>Fig. 9-3</i>	<i>Application result of distance between hole and bend rule.</i>	<i>96</i>
<i>Fig. 9-4</i>	<i>Application result of minimum fillet radius for injection mold.</i>	<i>98</i>
<i>Fig. 9-5</i>	<i>Application result of arc welding line length.</i>	<i>99</i>

1. 緒 論

1.1 研究の背景

製造業においては、製品のグローバル展開や顧客ニーズの多様化に伴い、製品の仕様数が増加している。例えば、トヨタ自動車株式会社では、国ごとに異なる法規や交通事情、多様化する顧客ニーズに対応するために、多種多様な車種を開発し市場に投入している(マイナビ, 2014)。この結果、2010年には114車種が販売され、1990年の74車種と比べ、1.5倍以上増加している。その一方で、この期間における従業員数は約7万人から大きな増減なく推移しており、開発車種数は増えても開発者・設計者の人数は増えていない。このような状況下において、多様化するニーズに対応するためには、より効率の良い製品開発が必須である。トヨタ自動車を含む自動車業界、および製造業全般において、「シミュレーションツールを用いたバーチャルプロセス」と「試作機を用いて実験を行うハードウェアプロセス」に対して、バーチャルプロセスにおける分析・検討を十分にを行い、ハードウェアプロセスを減らす取組みを強化している。このバーチャルプロセスの代表的なものとして、有限要素法等による数値シミュレーションを用いた性能や安全性、信頼性の評価が行われている。有限要素法によるシミュレーションを行うためには、解析モデルを作成する必要がある。コンピュータ処理能力や解析技術の持続的な向上に伴い、解析モデルの大規模化・詳細化が進んでいる。例えば、マツダ株式会社では、自動車の衝突安全性能を評価する解析において、1990年代初頭ではメッシュサイズが約100mmで総要素数が数万要素程度だったのに対して、2010年代初頭ではメッシュサイズは3~7mmまで詳細化し、総要素数も300~400万要素まで大規模化している(河野他, 2012)。このように、解析モデルの大規模化・詳細化が進んでいることで、従来の定性的評価から定量的評価が可能となり、ハードウェアプロセスを減らすことを実現してきた。この大規模化・詳細化の流れは、今後もますます進展することが予想され、解析モデルの作成作業の負担が増大してきていることが課題となっている(片岡, 2011)(坂本, 2014)(Kirkpatrick, 2000)。

1.2 従来技術の課題

解析モデルを効率よく作成する技術として、1970年代初頭からメッシュ自動生成技術が研究されている。従来のメッシュ自動生成技術はデローニ法(Fleischmann and Selberherr, 1997)やアドバンスングフロント法(Ito et al., 2007)などの幾何演算によって正多角形(正三角形や正方形)や正多面体(正四面体や立方体)に近いメッシュを生成する手法である。一般的な有限要素法は、正多角形や正多面体に近いほど解析精度が良くなるという性質があり、多くの解析分野においてメッシュ自動生成技術は実用化されている。一方で、自動車の衝突解析に代表される高度な解析においては、メッシュ形状が解析精度に大きな影響を与えるため、部位ごとにメッシュの仕様を定め、これを遵守することで、解析精度を担保している。このようなメッシュの仕様は、各社・各部門それぞれが有しており、同じ形状であっても同じメッシュを作成するとは限らず、個別のノウハウとなってい

る。汎用的なメッシュ自動生成技術では個別のノウハウには対応しきれないため、インタラクティブな操作でメッシュを修正しており、膨大なメッシュ作成工数を要していることが課題となっている。例えば、板金部品や肉厚の薄い樹脂部品などは、一般的に厚みのない中立面(シェルモデル)でモデル化するが、厳密な中立面が存在しえない形状もある。一例として、嵌合のためのスナップフィット形状の一例を Fig. 1-1 に示す。Fig. 1-1 (a)は代表的なスナップフィット形状を示しており、爪部には厳密な中立面は存在しない。実際には、例えば Fig. 1-1 (b)に示すような接触部の面を再現するようなメッシュを作成する必要がある。また、解析種類(応力解析, 振動解析, 衝突解析など)や各社のノウハウによっては、同じ形状であっても同じメッシュを作成するとは限らない。すなわち、汎用的な従来技術では個別のノウハウには対応しきれないという課題がある。さらには、この個別ノウハウは解析技術の進展や計算機処理能力の向上に伴い変化するため、個別ノウハウに対応した自動化技術やソフトウェアを開発しても、恒久的にメンテナンスしない限り陳腐化する恐れがある。

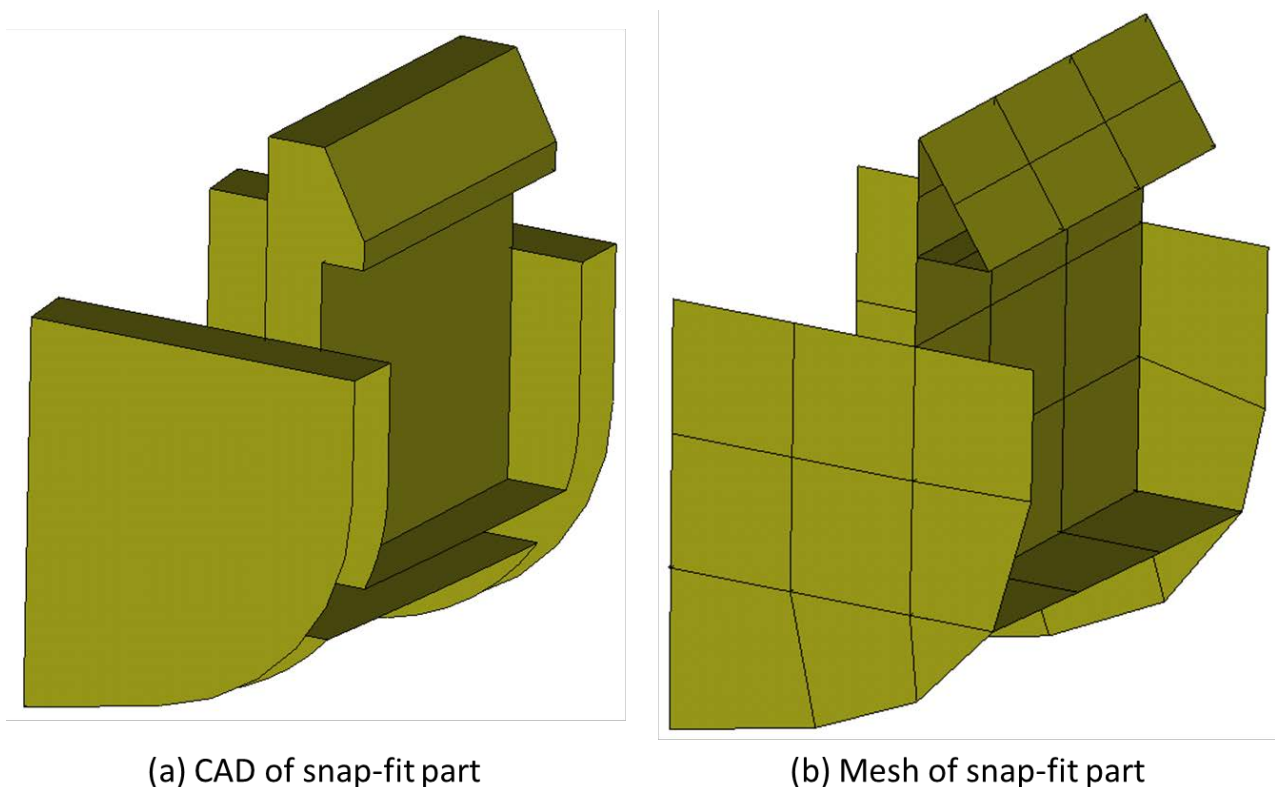


Fig. 1-1 CAD and mesh of snap-fit part. Snap-fit has no strict medial surface. In practice, it is necessary to create a mesh representing the contact surface as shown in (b).

1.3 本研究の目的

前節で示した課題を解決するために、本研究では以下の二つの目的を設定した。

- ① ノウハウに基づいて CAE 作業を自動化し、工数削減
 - ➔ ツール操作作業を最大限自動化することでモデル作成工数を削減し、シミュレーション検討回数を増やす
- ② ノウハウの進展に自動化ツールも追従
 - ➔ 使用実績が増えるほど自動化のレベルや解析モデルの精度が向上

2. 本研究のコンセプト

2.1 課題解決アプローチ

一般的な工業製品において、20%の部品が新規設計の必要な部品であり、40%は既設計部品の流用、40%は既設計部品の修正であると Gunn は示している(Gunn, 1982). より新しい研究においても、設計において約 75%は過去の設計知見を再利用していると Ullman は見積もっている(Ullman, 1997).

また、既設計部品に対して作成した解析実績のある解析モデルは必要十分な検討や評価が行われたものであるため、必要とされる品質を満たし、ノウハウが反映されたものとなっている。

そこで、この過去の解析モデルに着目し、これを再利用可能な単位で分類し、解析ノウハウとして蓄積し、この解析ノウハウを組合せて、新設計形状の解析モデルを自動作成することで、課題を解決できると考えた。例えば、嵌合のためのボスやスナップフィット、強度確保のためのリブなどは、配置位置は設計対象により様々であるものの、その形状種類は数パターンに限定されることが多い。すなわち、このような特徴的な部分形状に対して品質の良い解析に適したメッシュをあらかじめ準備しておき、新設計形状に対してこれらのメッシュを配置し、残った部分(例えば、意匠部)に対してのみ従来技術によりメッシュを生成することで、品質の良いメッシュを効率的に作成できるものと考えた。

2.2 解決手段の概要

開発技術の詳細を Fig. 2-1 に示す。本技術は、新設計の CAD モデル (Fig. 2-1 (1)) を入力として、新設計 CAD に対するメッシュ (Fig. 2-1 (7)) を出力するものである。本技術は、任意の新設計 CAD に対して適用可能であるが、特に薄板の樹脂部品に対して、厚みのないシェルに変換したメッシュを生成する場合の処理手順を説明する。

STEP.1 ノウハウデータベース(DB)登録：

過去の解析モデルからノウハウとする部分 CAD 形状(以降、ノウハウ形状と称する)と部分メッシュ(以降、ノウハウメッシュと称する)をノウハウ DB に登録する。なお、本作業は毎回の解析メッシュ作成作業時に行うものでなく、事前準備およびノウハウ DB メンテナンス時に実施するものである。

STEP.2 類似部分形状検索：

解析対象の新設計 CAD データからノウハウ形状に類似する部位を検索する。検索の結果、類似と判断された部分形状の集合である類似部分 CAD (Fig. 2-1 (4)) とそれ以外のベース部 CAD (Fig. 2-1 (3)) に分割する。

STEP.3 中立面生成：

ベース部 CAD(Fig. 2-1 (3))は厚みあるソリッドモデルであり、これより厚みのない板構造である

中立面を生成したのち、シェルメッシュの生成を行い、ベース部メッシュ (Fig. 2-1 (5)) を作成する。

STEP.4 メッシュモーフィング(フィッティング):

類似部分 CAD (Fig. 2-1 (4)) の各部位において、ノウハウ DB (Fig. 2-1 (2)) に登録された類似 CAD モデルに対応付けて登録されたメッシュをメッシュモーフィングにより変形させることで、類似部分メッシュ (Fig. 2-1 (6)) を作成する。

STEP.5 メッシュモーフィング(追加・削除) :

ベース部メッシュ (Fig. 2-1 (5)) と類似部分メッシュ (Fig. 2-1 (6)) を、接続部のメッシュ連続性を保つようにメッシュマージして、新設計メッシュ (Fig. 2-1 (7)) を生成する。

メッシュ作成にノウハウが必要な特徴部位は過去の解析モデルから再利用するので、実績と同水準のメッシュを作成でき、かつ残りのベース形状はシンプルな形状となり、従来技術でも十分な品質でメッシュを作成できる。仮に、ベース形状に対して、仕様を満たさないメッシュが作成された場合は、当該部位に対してのみ仕様を満たすようにメッシュを修正し、解析ノウハウ DB に登録する。以降の新設計形状に対するメッシュ作成において、当該部位は再利用されるので、メッシュ修正作業は不要になる。このように、解析ノウハウ DB を拡充していくことで、自動化率が向上する。

これらの手順において、STEP.2 類似部分形状検索、STEP.3 中立面生成、STEP.4 と STEP.5 メッシュモーフィングが本技術を実現するためのキーとなる要素技術である。

本論文では、システムの全体構成およびノウハウ DB 登録を第二章、類似部分形状検索技術を第三章、中立面生成技術を第四章、メッシュモーフィングを第五章にて説明し、これらの技術を活用して開発したメッシュ自動生成システムを第六章、実際の設計 CAD データへの適用と検証を第七章に記載する。最後に得られた結論と今後の展望について、第八～九章に記載する。



Fig. 2-1 High-precision analysis model generation technique for structures with complicated curved surfaces and protrusion shapes.

3. システム全体構成とノウハウ DB

本研究において、ユーザインタフェースはすべて Web ブラウザ上で動作するように実装した。また、メッシュ作成のための各処理はクラウド上に実装できるようにした。これにより、設計者などのユーザが使用する PC には、特別なソフトウェア等のインストールを不要にし、また常に最新の環境で実行できるようにした。

システム構成の概要図を Fig. 3-1 に示す。ユーザが使用するクライアント PC では Web ブラウザ上で下記の操作を行える。

- 製品全体 or 部位単位 of CAD データを登録
- ノウハウデータの登録や改廃
- 適用ノウハウ(解析種/詳細度)を指定
- 作成メッシュやノウハウ適用情報の確認

ここで指定された情報やデータをクラウド上に転送する。ノウハウデータは作成したメッシュは DB に格納する。ノウハウデータは解析種ごとに管理できるようにしており、衝突解析や強度解析、振動解析などの解析の種類や、解析規模の大小といった種別ごとに登録・管理している。このように、解析種に応じた形状やメッシュをノウハウとして管理できるようにした。

クラウドサーバにて以降の章で説明する各種技術を実装したソフトウェア(処理エンジン)が実行され、作成したメッシュをクライアント PC へ転送する。



Fig. 3-1 Overview of system configuration.

4. 類似部分形状検索技術

4.1 従来の形状検索技術の課題

3D-CAD モデルの有効活用のために、類似形状検索技術が幅広く研究されている (Iyer et al., 2005). 一方で、先行技術の多くは部品単位で全体的に形が似ている 3D-CAD モデルを検索するものである (Osada et al., 2002) (El-Mehalawi and Millerb, 2003) (Ohbuchi et al., 2003) (You and Tsai, 2009). 一般的な 3D-CAD モデルは嵌合のための突起形状(スナップフィット形状や、ねじ穴のためのボス, など)や、補強のためのリブ形状などの特徴的な形状が多くある. これら特徴形状には、強度や性能のためのノウハウが含まれており、重要な解析結果評価個所であるため、仕様に沿ったメッシュが必要である. しかし、このような部分的な形状に対しては、形状全体の類似度を評価し、検索する技術は適用できない. 部分的な類似形状を検索する方法としては、3D-CAD モデルに対して作成したポリゴンメッシュの頂点間の距離や法線ベクトル角度などを用いて類似部分形状を検索する手法が提案されている(Hidaka et al., 2015) (山内他, 2011) (Attene et al., 2010) (Biasotti et al., 2006) (Gal and Cohen-Or, 2006). 形状全体の類似度を評価する先行技術はモデルに対して一つの特徴量を計算し、この特徴量の差から類似度を計算するのに対して、類似部分形状を検索する技術は、モデルの一部を抜き出して、部分ごとに特徴量を計算する. 検索キーとなる形状に対して計算した特徴量と、検索ターゲットの 3D-CAD モデルに計算した部分ごとの特徴量を比較することで類似度を計算する. しかしながら、この方法は部分ごとの特徴量を計算しているのみであり、検索キー形状と検索ターゲットの部分形状の対応関係を求めることはできない. 例えば、スナップフィット形状において、嵌合時に接する面は、位置情報を決定するために重要であるが、従来技術では、この面の対応関係を得ることができない. すなわち、再利用する際には、位置情報をインタラクティブに指定する必要がある、自動化レベルの点で課題が残る. 一般的な 3D-CAD モデルは境界表現(B-Rep)となっているので、この境界表現の構成要素である面に対して、対応関係を得ることができれば、位置情報も自動的に決定することができ自動化レベルが向上する. そこで、面の対応関係も抽出可能な境界表現 3D-CAD モデルの類似部分形状認識技術を開発することとした.

4.2 解決手段の概要

本開発では、3D-CAD モデルを構成する面(Surface)をノード、隣接している2つの面をエッジでつないだグラフを用いることとした. Fig. 4-1 に処理手順の概要を示す. メッシュの作成対象である新設計形状の CAD モデル (以降、ターゲット形状と称す) に対して作成したグラフから検索キーとなるノウハウ DB に登録されているノウハウ形状に対して作成したグラフと類似する部分グラフを検索し、部分グラフに対して類似度を計算する. 類似度としては、幾何的な類似度と、位相的な類似度を用い、これらの線形和とした. 幾何的な類似度は、面積や周長などの幾何情報に基づいて計算する. 位相的な類似度は、面の接続関係(位相情報)に基づいて計算する. この類似度がしき

い値以上となる部分グラフを検索ターゲットのグラフから探索する。

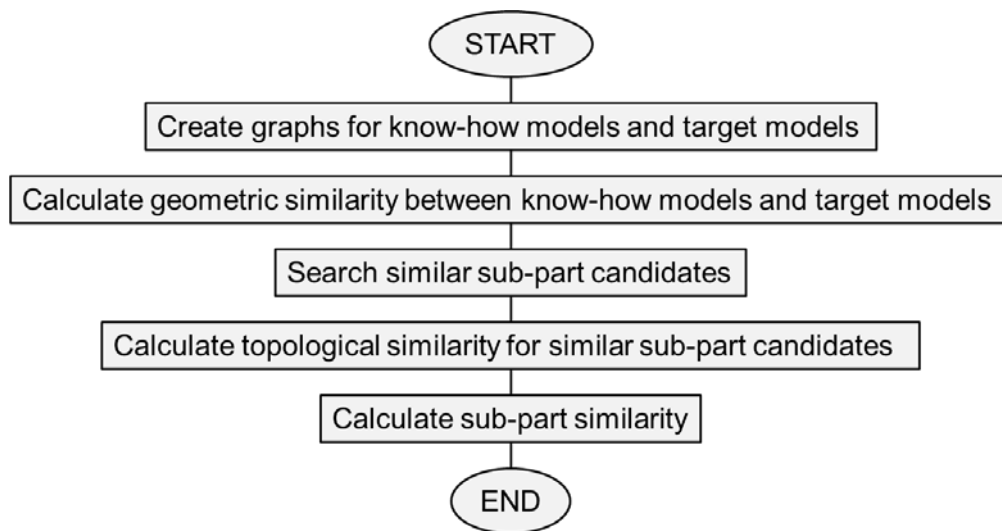


Fig. 4-1 Procedure of similar sub-part search.

4.3 グラフモデル

ノウハウ形状とターゲット形状に対して、面をノード、隣接している2つの面をエッジでつないだグラフを作成する。例えば、Fig. 4-2の左列に示すノウハウ形状とターゲット形状においては、右列に示すグラフが作成される。ノウハウ形状においては、面C1と面C2は接しているため、グラフにおいてはノードC1とノードC2はエッジで接続し、面C1と面C3は接していないため、グラフにおいてはノードC1とノードC3はエッジで接続しない。なお、本グラフにおいて、ノードと面の対応関係がわかりやすいようにノードを配置しているが、位置は考慮していない。

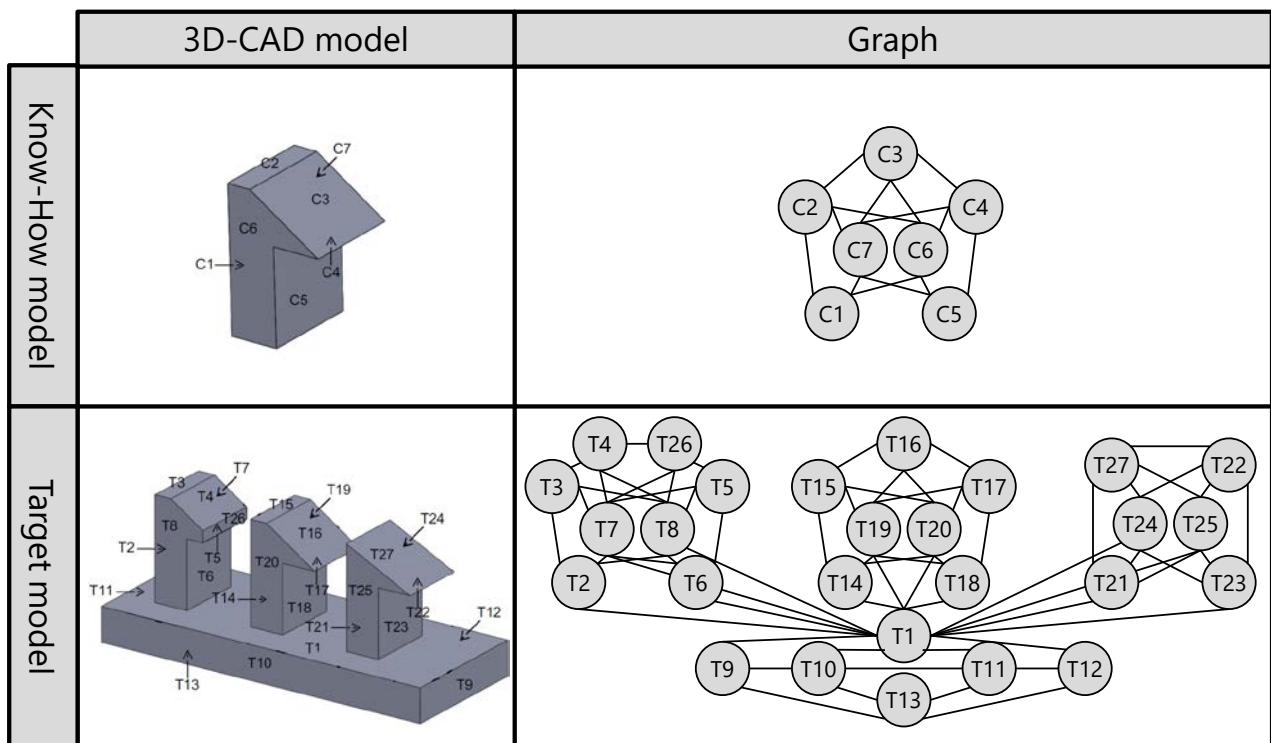


Fig. 4-2 3D-CAD models and graphs. The graphs consist of the nodes representing the surfaces and the connections representing the edges that adjacent two surfaces.

4.4 幾何類似度の計算

ノウハウ形状とターゲット形状の全ての面の組み合わせに対して、幾何的な類似度を計算する。各面の幾何類似度は式(4-1)により計算する。この式において、幾何パラメータとは、面積や周長（境界稜線長さの総和）などの幾何的な情報のことである。なお、この幾何的な情報には、座標や法線のような配置姿勢に関わる情報は含まない。これにより、配置位置や向きによらない類似形状の検索を実現する。幾何類似度は0.0~1.0の範囲となり、1.0で同一形状の面であり、1.0に近いほど似ている面であることを示す。Fig. 4-2に示したノウハウ形状とターゲット形状に対して、幾何類似度を計算した結果をTable 4-1に示す。本例では、幾何パラメータとして、面積と周長を用い、それぞれの重み(w_i)は0.5としている。

なお、幾何パラメータは面の特徴を表す値を使うことができ、面積や周長の他には、面の主方向長さや平均/最大/最小曲率などが考えられる。

$$S_G = 1.0 - \sum_{i=0}^n \left(w_i \frac{|pc_i - pt_i|}{\max(pc_i, pt_i)} \right) \quad (4-1)$$

n : 幾何パラメータの数

w_i : 幾何パラメータ i の重み ($\sum_{i=0}^n w_i = 1.0$)

pc_i : ノウハウ形状の面の幾何パラメータ i の評価値 (例えば, 面積や周長)

pt_i : ターゲット形状の面の幾何パラメータ i の評価値

Table 4-1 Geometric similarity scores of the sample models.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
T1	0.462	0.223	0.374	0.292	0.390	0.331	0.331	T14	1.000	0.400	0.745	0.547	0.790	0.716	0.716
T2	1.000	0.400	0.745	0.547	0.790	0.716	0.716	T15	0.400	1.000	0.507	0.680	0.483	0.525	0.525
T3	0.400	1.000	0.507	0.680	0.483	0.525	0.525	T16	0.745	0.507	1.000	0.714	0.940	0.837	0.837
T4	0.600	0.619	0.790	0.897	0.746	0.808	0.808	T17	0.547	0.680	0.714	1.000	0.675	0.764	0.764
T5	0.400	1.000	0.507	0.680	0.483	0.525	0.525	T18	0.790	0.483	0.940	0.675	1.000	0.811	0.811
T6	0.790	0.483	0.940	0.675	1.000	0.811	0.811	T19	0.716	0.525	0.837	0.764	0.811	1.000	1.000
T7	0.700	0.532	0.866	0.770	0.841	0.950	0.950	T20	0.716	0.525	0.837	0.764	0.811	1.000	1.000
T8	0.700	0.532	0.866	0.770	0.841	0.950	0.950	T21	1.000	0.400	0.745	0.547	0.790	0.716	0.716
T9	0.800	0.475	0.852	0.680	0.880	0.885	0.885	T22	0.547	0.680	0.714	1.000	0.675	0.764	0.764
T10	0.644	0.330	0.600	0.462	0.602	0.555	0.555	T23	0.790	0.483	0.940	0.675	1.000	0.811	0.811
T11	0.800	0.475	0.852	0.680	0.880	0.885	0.885	T24	0.689	0.547	0.802	0.787	0.780	0.954	0.954
T12	0.644	0.330	0.600	0.462	0.602	0.555	0.555	T25	0.689	0.547	0.802	0.787	0.780	0.954	0.954
T13	0.378	0.203	0.308	0.249	0.321	0.297	0.297	T26	0.345	0.794	0.430	0.562	0.411	0.435	0.435
								T27	0.842	0.458	0.881	0.636	0.936	0.790	0.790

4.5 類似部分形状候補の探索

類似部分形状を検索することにおいて、位相が完全一致している必要はない。例えば、Fig. 4-2 に示したノウハウ形状に対して、ターゲット形状の3つの突起は類似している形状として判定されることが望ましいが、それぞれの突起は面数も異なり、位相は一致していないため、グラフは同型とはならず、ノードの過不足が生じる。これは、同型の部分グラフを検索することではないことを意味している。同型の部分グラフを検索するアルゴリズムは先行研究 (長屋他, 2006) (Cordella et al., 2001) (Ullmann, 1976)が進んでいるものの、本技術には適用できない。そこで、同型ではないが、類似している部分グラフを検索する手法を開発した。

ターゲット形状の面数(ノード数)を T_n 、ノウハウ形状の面数を C_n とすると、この類似部分グラフの候補となる組み合わせの数は $T_n! / (T_n - C_n)!$ と膨大な数となるため、候補を絞り込む必要がある。この方法を Fig. 4-2 に示したモデルを例に用いて説明する。

Step. 1 幾何類似度がしきい値以上になっている面の組み合わせを抽出する。Table 4-1 に示した幾何類似度において、赤色で示したセルがしきい値(本例では 0.8)以上になって

いる面の組み合わせである。

- Step. 2 ターゲット形状の各面において、ノウハウ形状のいずれかの面と幾何類似度がしきい値以上になっている面を類似候補面とする。本例では、面 T1, T10, T12, T13, T26 以外の面が類似候補面となる。
- Step. 3 ターゲット形状のグラフから、類似候補面以外の面に相応するノードを削除し、独立集合を抽出する。本例における、類似候補面以外のノードを白抜きにしたものを Fig. 4-3 に示す。独立集合は丸で囲んだ、[T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8] , [T14, T15, T16, T17, T18, T19, T20] , [T21, T22, T23, T24, T25, T27]の三つの独立集合となる。以降、これらの独立集合をそれぞれ、グループ A, B, C と称する。
- Step. 4 ノウハウ形状の面と各グループの構成面において、幾何類似度がしきい値以上になっている組み合わせを類似部分形状候補とする。例えば、グループ A の場合、C1 は [T2], C2 は [T3, T5], C3 は [T6, T7, T8], C4 は [T4], C5 は [T6, T7, T8], C6 は [T4, T6, T7, T8] , C7 は [T4, T6, T7, T8]と幾何類似度がしきい値以上になっているので、これらの組み合わせが類似部分形状候補となる。なお、組み合わせ数はノウハウ形状の各面に対する類似候補面の数の総積となる。グループ A の場合、C1~C7 に対する類似候補面の数はそれぞれ、1, 2, 3, 1, 3, 4, 4 となるので、288 通りである。
- Step. 5 類似部分形状候補に囲まれている面を、この類似部分形状候補に追加する。例えば、面 T26 はグループ A の面に囲まれているので、この面をグループ A に含める。

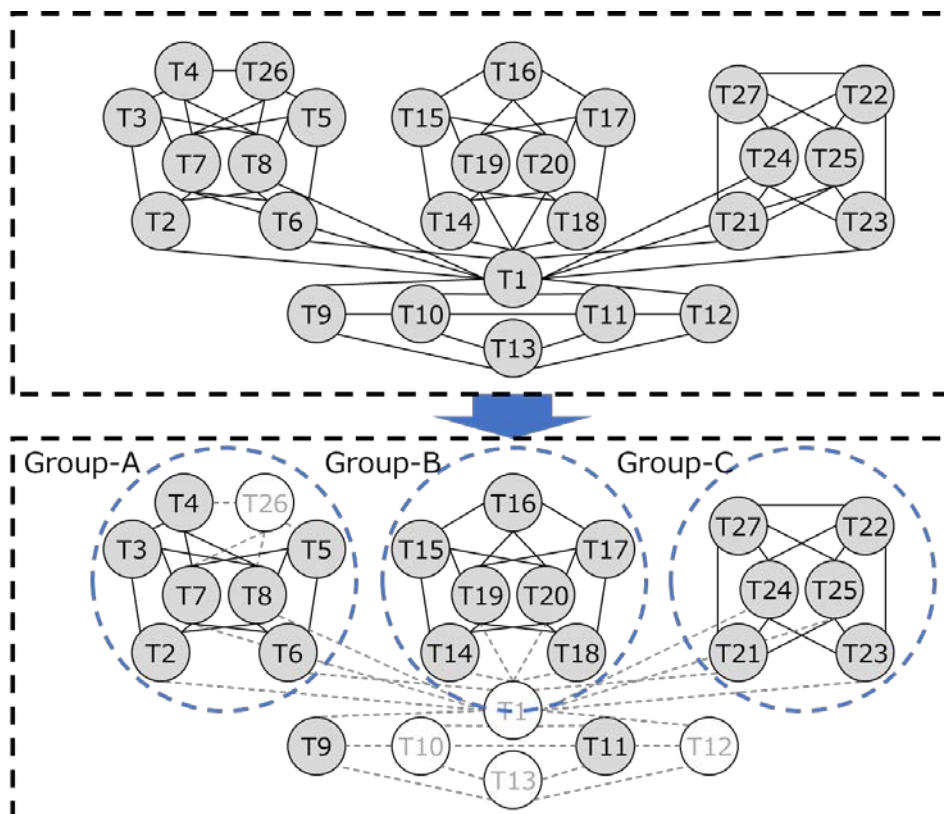


Fig. 4-3 Example of specifying search candidates.

この Step.1~5 の処理により類似部分形状候補の組み合わせ数を絞りこむ。本例で示した簡易モデルにおいても、絞り込み前の組み合わせ数は $27!(27-7)!=4,475,671,200$ という膨大な数であるが、この処理を行うことにより、グループ A, B, C の組み合わせ数はそれぞれ、288, 256, 144 通りとなり、合計 688 通りまで削減できる。ノウハウ形状、ターゲット形状の面数が多いほど削減率は高くなるので、有効な手段であると考えられる。

なお、本例では Step.1 において幾何類似度のしきい値を 0.8 として説明したが、この値を小さくすることでより多くの類似部分形状候補を抽出できるようになる。一方で、類似部分形状候補の組み合わせ数が多くなるので計算量は増大する。例えば、このしきい値を 0.6 とした場合、Step.3 で抽出される独立集合は、グループ A に[T26]が追加され、また[T9, T10, T11, T12]の独立集合(グループ D)が追加される。また、ノウハウ形状の各面に対する類似候補面の数も増加するので、グループ A~D の類似部分形状候補の合計組み合わせ数は約 14 万通りとなり、しきい値 0.8 の場合の組み合わせ数と比較し約 200 倍の計算量が必要になる。ただし、このしきい値を 0.6 にするという事は、面積や周長などの幾何パラメータが 0.6 倍程度変化してもメッシュを再利用することを意味し、メッシュサイズの観点から解析対象によっては適さなくなることが多い。説明を簡単にするために周長だけに着目し、例をあげて説明する。ノウハウメッシュのメッシュサイズが 2.0mm、ノウハウ形状に周長 20mm の面があったとする(境界線の分割数は 10 となる)。これに対し、ターゲット形状に周長が 33mm の面があった場合、幾何類似度は 0.606 となる。これを許容してメッシュを流用すると、メッシュサイズは 3.3mm になる(境界線の分割数は 10 のままである)。メッシュの仕様は解析対象や要求精度により異なるが、例えば基準サイズ(2.0mm)±50%以内という仕様があったとすると、違反することになる。この場合、周長が約 30mm で分割数が 15 の形状とメッシュをノウハウ DB に登録すべきである。すなわち、メッシュサイズとして許容する範囲などのメッシュに要求される仕様の観点からノウハウ DB に登録するノウハウ形状とメッシュ、およびしきい値を検討すべきである。

4.6 位相類似度の計算

類似部分形状候補の各面の隣接関係と、これらの面に対応するノウハウ形状の各面の隣接関係の差異に基づいて式(4-2)により位相類似度を計算する。幾何類似度と同様に、0.0~1.0 の範囲となり、1.0 で同一位相となり、1.0 に近いほど似ている位相であることを示す。ここで、対応関係の無い面、例えば前節で示した類似部分形状候補の探索手順 Step.5 にて追加された類似部分形状候補の面に対応するノウハウ形状の面は存在しない。このような対応関係の無い面が存在する場合は、どの面とも隣接しないダミーの面を追加して、これと対応付ける。この方法を Fig. 4-2 に示したターゲット形状における面群[T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T26]が類似部分形状候補として探索された場合を一例として説明する。類似部分形状候補の面群とノウハウ形状の面群において、隣接している 2 面に対して 1.0、隣接していない 2 面に対して 0.0 を設定した行列を作成する。表 2 は類似部分形

状候補，表3はノウハウ形状に対して作成した行列である．本例においては，類似部分形状候補の面[T26]に対応するノウハウ形状の面は存在しないので，どの面とも隣接しないダミーの面[Cd]を追加している．なお，これらの行列は式(4-2)における $tt_{i,j}$ ， $tc_{i,j}$ に相当する．これら行列における要素間の差異を示す行列($a_{i,j}$)を求め，位相類似度 S_T を算出する．本例においては，行列($a_{i,j}$)は表4に示す値となり， $S_T = 0.844$ となる．

$$S_T = \left(\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m a_{i,j} \right) / m^2 \quad (4-2)$$

$$a_{i,j} := \begin{cases} 1.0 & \text{if } tc_{i,j} = tt_{i,j} \\ 0.0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$tc_{i,j} := \begin{cases} 1.0 & \text{if ノウハウ形状の面}i\text{と面}j\text{は隣接している} \\ 0.0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$tt_{i,j} := \begin{cases} 1.0 & \text{if ターゲット形状(類似部分形状候補)の面}i\text{と面}j\text{は隣接している} \\ 0.0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

m : 面数

Table 4-2 Adjacency matrix of similar sub-part

($tt_{i,j}$)

	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T26
T2	1	1	0	0	0	1	1	0
T3	1	1	1	0	0	1	1	0
T4	0	1	1	0	0	1	1	1
T5	0	0	0	1	1	1	1	1
T6	0	0	0	1	1	1	1	0
T7	1	1	1	1	1	1	0	1
T8	1	1	1	1	1	0	1	1
T26	0	0	1	1	0	1	1	1

Table 4-3 Adjacency matrix of know-how

model ($tc_{i,j}$)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Cd
C1	1	1	0	0	0	1	1	0
C2	1	1	1	0	0	1	1	0
C3	0	1	1	1	0	1	1	0
C4	0	0	1	1	1	1	1	0
C5	0	0	0	1	1	1	1	0
C6	1	1	1	1	1	1	0	0
C7	1	1	1	1	1	0	1	0
Cd	0	0	0	0	0	0	0	1

Table 4-4 Adjacency relation difference matrix ($a_{i,j}$)

1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	0	1	1	1	0
1	1	0	1	1	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	1

1	1	1	1	1	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	0
1	1	0	0	1	0	0	1

4.7 部分形状類似度の計算

類似部分形状候補とノウハウ形状における対応関係にある面同士の幾何類似度と位相類似度から式(4-3)により部分形状類似度(S)を計算する。ここで、 $S_{G,i}$ はノウハウ形状における i 番目の面とこの面に対応付けられたターゲット形状の面に対して式(4-1)により計算した幾何類似度(S_G)を示す。

Fig. 4-2 に示したノウハウ形状とターゲット形状に対して計算した部分形状類似度を Table 4-5 に示す。この表はノウハウ形状の各面に対応するターゲット形状の面、および各種類似度を示している。なお、本例では幾何類似度と位相類似度の重みはいずれも 0.5 として計算している。

ノウハウ形状と完全に同じ形状である中央の突起部は類似度 1.0 と判定されており、面も正確に対応付けられている。左側の突起は部分形状類似度 0.821 と判定されている。これは、ノウハウ形状の C3 と C4 に対応するターゲット形状の面 T4 と T5 の間に T26 があり、位相が異なる部分形状であるため、位相類似度は 0.844 となった。また、C3, C4 と T4, T5 の面は面積や周長が異なるため幾何類似度は 0.796 となった。右側の突起はノウハウ形状の C7 に対応するターゲット形状の面が存在しない部分形状であり、部分形状類似度 0.811 (幾何類似度 0.827, 位相類似度 0.796)と判定された。本例においては、3 つの部分形状において、幾何類似度と位相類似度がほぼ同じ値になったので、これらの重みの影響は小さい。但し、4.5 節にて説明したように、メッシュを再利用するという観点から幾何類似度を優先($w_G \geq w_T$)する方が良い。

なお、本例における計算時間は 0.01 秒以下(Intel® Xeon® E5640 2.67GHz×2 の Windows 7 PC を利用)であり、十分な速度で計算できているものとする。

$$S = w_G \sum_{i=0}^m S_{G,i} / m + w_T S_T \quad (4-3)$$

w_G : 幾何類似度の重み

$S_{G,i}$: ノウハウ形状の面 i と、これに対応するターゲット形状の面の幾何類似度

w_T : 位相類似度の重み (但し, $w_G + w_T = 1.0$)

m : 面数

Table 4-5 Similarity scores of the sample models.

	Face ID								Sub-part Similarity Score	Geometrical Similarity Score	Topological Similarity Score
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7				
Similar sub-part #1 (Center)	T14	T15	T16	T17	T18	T20	T19		1.000	1.000	1.000
Similar sub-part #2 (Left)	T2	T3	T4	T5	T6	T8	T7	T26	0.821	0.796	0.844
Similar sub-part #3 (Right)	T21	T27	T22	T23	T21	T24			0.811	0.827	0.796

4.8 類似部分形状検索技術の検証

Fig. 4-4 の(a)~(d)に示すキーモデルを(e)に示すターゲットモデル(電子部品カバー)から検索した結果を説明する。これらのキーモデルは全てターゲットモデルに含まれる部分形状である。また、ターゲットモデルには類似の部分形状が複数存在するが、それぞれの形状は、寸法を変える、フィレットを追加する、などして、完全に一致しない部分形状も意図的に加えている。それぞれのキーモデルに対して、類似度が 0.8 以上となった部分形状を強調表示した結果を Fig. 4-4 (f)に示す。また、キーモデルと類似部分形状の類似度を Table 4-6 に示す。完全に一致する部分形状は類似度 1.0 として、部分形状の大きさ(寸法)や位相が異なる(フィレット追加)部分形状は類似度が 0.8 以上になっていることを確認した。キーモデル#1 と部分類似形状 1a は完全に一致する形状であるので、類似度は 1.0 であり、部分類似形状 1d は寸法が異なるので、類似度は 0.88 となっている。キーモデル#2 と部分類似形状 2a は完全に一致する形状であるので、類似度は 1.0 と正常に計算できた。部分類似形状 2b, 2c, 2d はリブ高さの寸法が異なり、キーモデルのリブ高さが 12mm に対して、2b, 2c, 2d のリブ高さはそれぞれ、18mm, 17mm, 16mm である。2d が最も似ている形状であり、2b が最も似ていない形状である。計算した類似度は、それぞれ 0.87, 0.89, 0.91 となり、形状の類似性を反映できていることを確認した。キーモデル#3 と部分類似形状 3a は完全に一致する形状であるので、類似度は 1.0 と正常に計算できた。部分類似形状 3c は爪部の角にフィレットがついており、位相は一致していないが、類似度は 0.89 として計算できることを確認した。

なお、キーモデルと類似部分形状において、キーモデルの面と部分形状の面の対応関係を正常に取得できていることも確認している。

キーモデル#1 に対して、類似度が 0.8 未満となった部分形状の一例を Fig. 4-5 に示す。この部分

形状は Fig. 4-4(d)に示したキーモデルの一部分である。この例は、位相構造は一致しているのに位相類似度は 1.0 であるが、面積や周長は異なるため幾何類似度は 0.45 となり、部分形状の類似度は 0.725 であった。この部分形状はキーモデル#1 を再利用するような部分ではないので、この結果は妥当であると考えられる。

なお、本検証例題における計算時間は合計 2 秒であり、実用的な速度で計算できているものと考えられる。

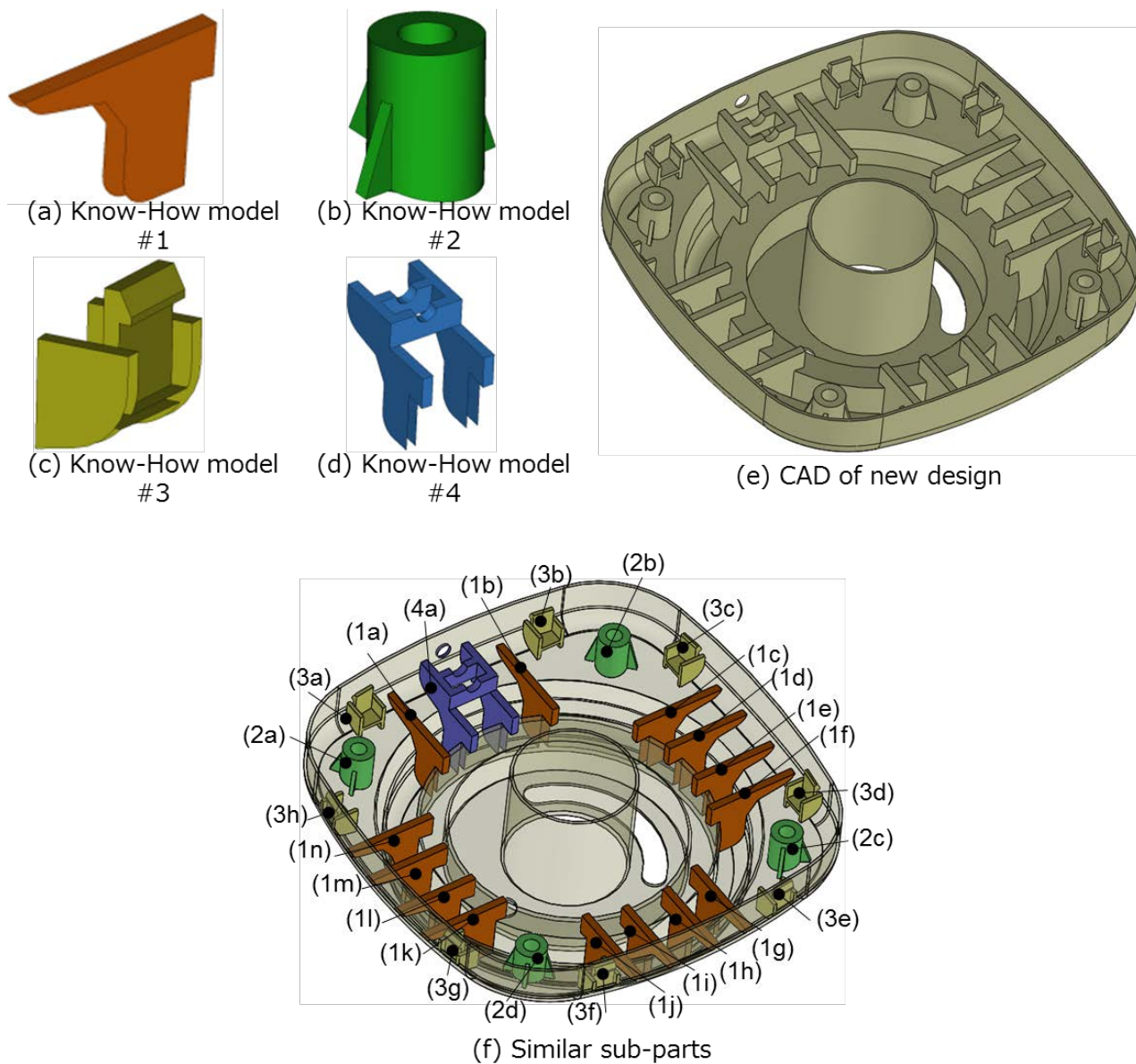
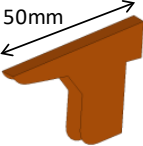
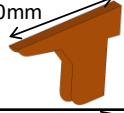
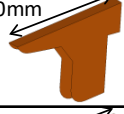
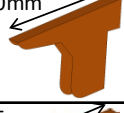
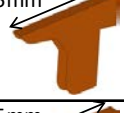
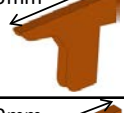
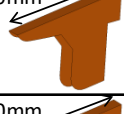
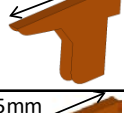
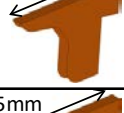
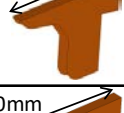
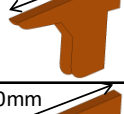
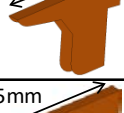
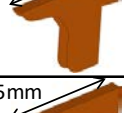
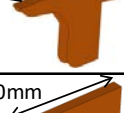
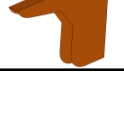
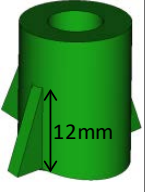
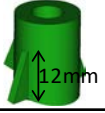
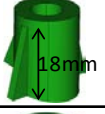
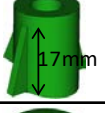
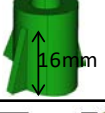
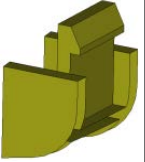
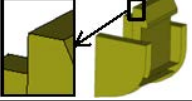
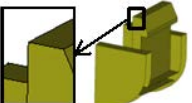
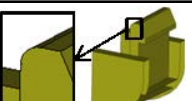
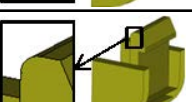








Fig. 4-4 Example models for evaluation.

Table 4-6 Similarity score.

Key Model	Similar Sub-parts	Similarity Score
#1 	1a 	1.00
	1b 	1.00
	1c 	1.00
	1d 	0.88
	1e 	0.88
	1f 	1.00
	1g 	1.00
	1h 	0.88
	1i 	0.88
	1j 	1.00
	1k 	1.00
	1l 	0.88
	1m 	0.88
	1n 	1.00

Key Model	Similar Sub-parts	Similarity Score
#2 	2a 	1.00
	2b 	0.87
	2c 	0.89
	2d 	0.91
#3 	3a 	1.00
	3b 	1.00
	3c 	0.89
	3d 	0.89
	3e 	1.00
	3f 	1.00
	3g 	0.89
	3h 	0.89
#4 	4a 	1.00

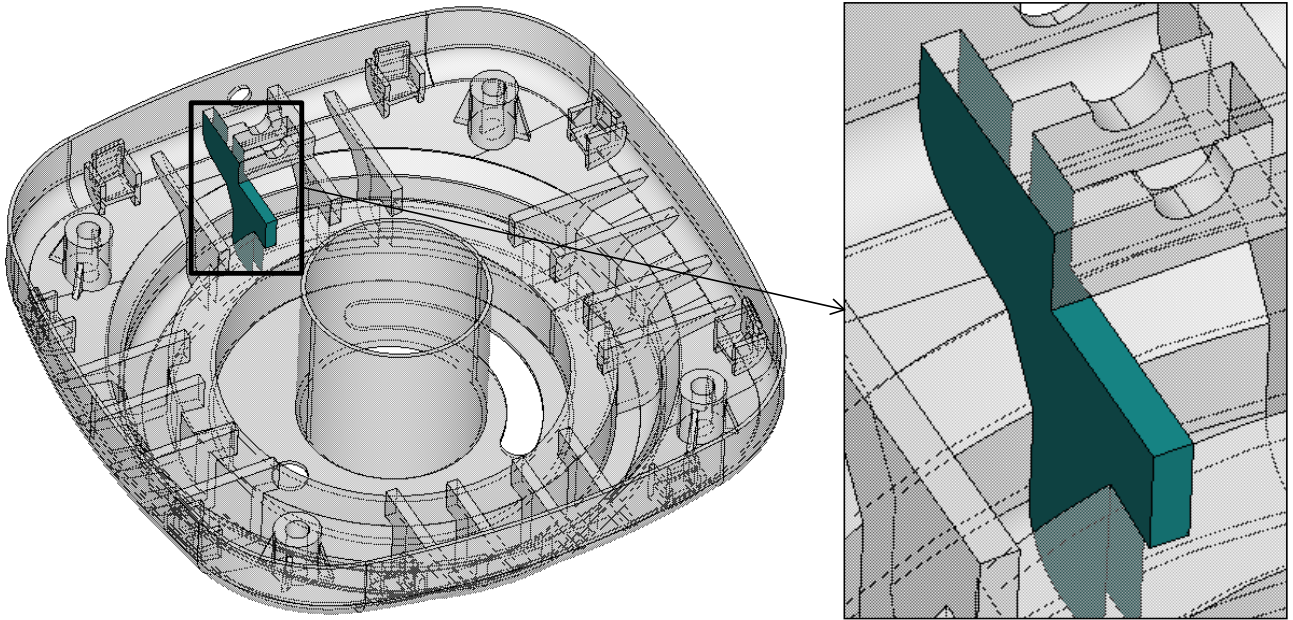


Fig. 4-5 Example of a dissimilar sub-part.

5. 中立面自動生成技術

5.1 従来技術の課題

これまでも、ソリッドモデルからシェルメッシュ解析用の中立面モデル（シェルメッシュの元となる面のみで構成される形状モデル）を作成する技術の開発が進められている(Armstrong et al., 1995) (Sheehy et al., 1995) (Donaghy et al., 1996). しかしながら、これらの方法ではリブ部において、リブの付根部で歪んだ中立面が作成される、またはリブの中立面がリブの土台の中立面を突き抜ける場合があるという制約があった(小野寺, 西垣, 2002). また、これらの方法では幾何的な中央に中立面モデルを作成するが、特に板厚が一定ではない段差があるソリッドモデルにおいて解析種類によっては幾何的な中央の中立面モデルでは十分な精度で解析できない場合がある. この一例を Fig. 5-1 に示す. Fig. 5-1(a)のソリッドモデルに対して、中立面モデルとして幾何的な中央に面を作成すると Fig. 5-1 (b)になる. これをそのまま解析に用いると丸囲み部分で実際とは異なる曲げモーメントが発生する. このような場合は、幾何的な中央に面を作成するのではなく Fig. 5-1(c)のように段差の無い中立面モデルを作成することが多い. また、同じソリッドモデルでも座屈が発生するような場合は、Fig. 5-1(b)の中立面モデルを作成し、段差部の縦方向の面を剛体にする等の解析条件を設定した解析を行う場合も考えられる. すなわちソリッドモデルから一意に中立面モデルの形状を決定できないので、解析に応じて等価な中立面モデルを作成する必要がある. そこで筆者らは、上記2つの従来技術の制約を解決するために、リブのあるソリッドモデルから中立面モデルを生成する技術及び、幾何的な中央ではなく解析モデルとして等価な中立面モデルを生成する新たな技術を開発することとした.

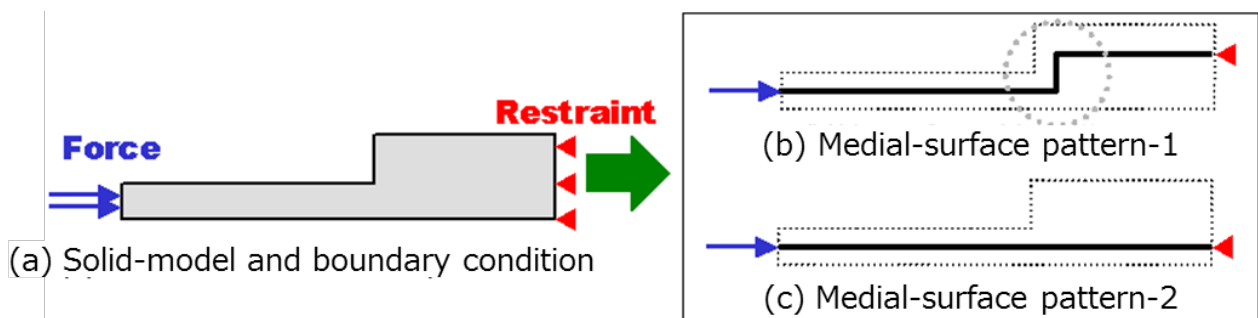


Fig. 5-1 Example of medial-surface shape in step structure.

5.2 中立面自動生成の概略手順

本研究では、3次元CADで作成したソリッドモデルから解析用の中立面モデルを自動生成する技術を開発した. 本節では、中立面モデルの自動生成アルゴリズムの概要を Fig. 5-2 と Fig. 5-3 に沿って説明する.

- (1) ソリッドモデルと板厚寸法の入力 (Fig. 5-2(a))

中立面モデル生成の対象となるソリッドモデルと、基準板厚寸法を入力する。板厚が変化している場合には、板厚の最大値を入力する。

(2) 薄板部の対向2面の認識処理 (Fig. 5-2 (b))

板厚が入力された基準板厚寸法以下のソリッドモデルの薄板部の対向する2面（以下、ペア面と呼ぶ）を探索する。Fig. 5-3(b)の場合、面Aと面D、面Bと面D、面Cと面D、面Eと面Fがそれぞれペア面である。

(3) 端部面と接続面の認識処理 (Fig. 5-2 (c))

前述の処理でペア面として認識されなかった面に対して端部面と接続面の認識を行う。ここでいう端部面とはソリッドモデルの側面となる面である。接続面とは、端部面でもペア面でもないペア面同士を接続する面であり、板厚変化部のペア面を接続する面等が該当する。Fig. 5-3 (c)の場合、端部面は面G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Qとなり、接続面は面Rとなる。

(4) リブ面の認識処理 (Fig. 5-2 (d))

前述の処理でペア面として認識された面に対して、リブとなっている面を探索する。本論では、ソリッドモデルにおける薄板対向部の片側にのみ薄板対向面の両面が接続している部分リブと呼ぶこととする。Fig. 5-3 (d)の場合、リブ面は面E, 面Fとなる。また、リブ面と区別するために、リブ以外の面を一般面と呼ぶこととする。

(5) 対向関係の面グループの認識処理 (Fig. 5-2 (e))

ソリッドモデル境界面の接続関係に基づいて、前述の処理でペア面として認識された面と接続面を対向関係にある2つの面グループとしてグルーピングする。なお、本技術では便宜上、対向関係の片側の面群を表側面、もう一方の面群を裏側面と呼ぶこととする。これは実際の形状の表側、裏側を指すものではなく、あくまでも便宜上の名称である。Fig. 5-3 (e)において、表側面は面D, 面Eであり、裏側面は面A, 面R, 面C, 面F, 面Rである。

(6) 中立面モデル作成基準面の指定 (Fig. 5-2 (f))

中立面モデルの作成基準面として、表面または裏面いずれか一方を指定する。Fig. 5-3 (f)の場合、表側面を基準としたものであり、面Dと面Eが作成基準面となる。

(7) 片側面のオフセット処理 (Fig. 5-2 (g))

指定された側の面群をオフセットする。またオフセット距離は任意に指定できる。Fig. 5-3 (g)の場合、面D'は面Dから、面E'は面Eからオフセットされたものである。

(8) リブ面の延長処理 (Fig. 5-2 (h))

リブ面からオフセットされた面を、リブ面と接続している面またはリブ面と接続している面のペア面からオフセットされた面まで延長する。Fig. 5-3 (h)の場合、リブ面Eからオフセットされた面E'を、リブ面Eと接続している面Cのペア面である面Dからオフ

セットされた面 D' まで延長する。

(9) 板厚寸法の設定処理 (Fig. 5-2 (i))

これまでの処理で作成された中立面モデルの各面に対して、ペア面の面間距離に基づいて板厚寸法を属性として付与する。

これらの処理を自動的に行うことにより、ソリッドモデルから解析用の中立面モデルを自動生成する。本処理ではリブ面を認識しているため、正確に接続した中立面モデルを作成できるという特徴がある。

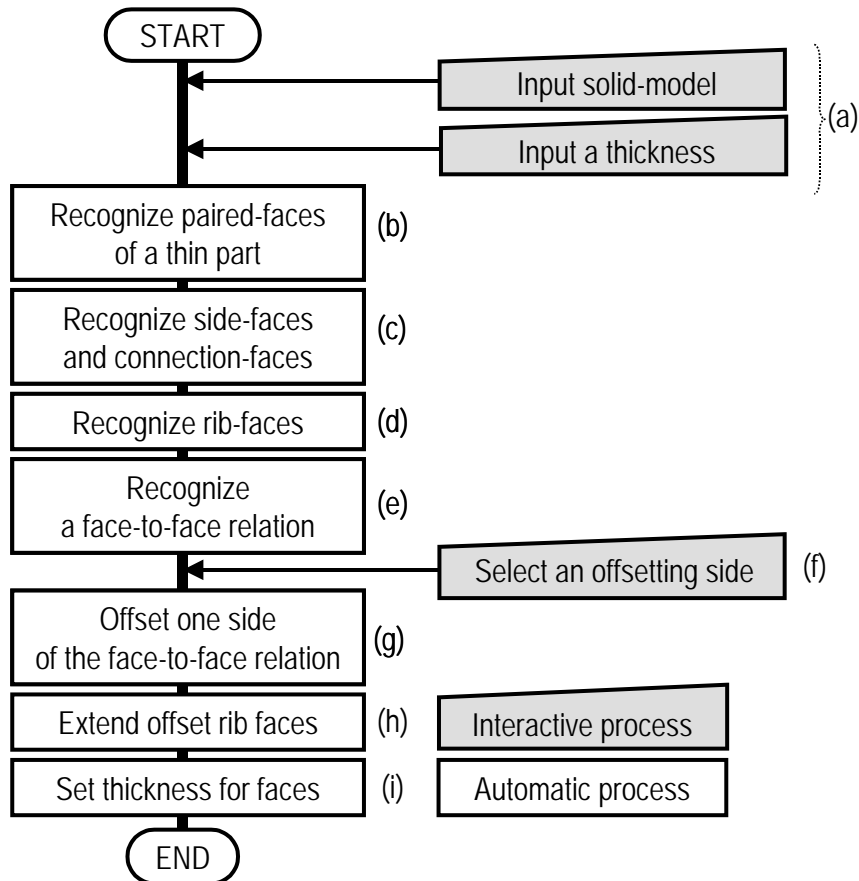


Fig. 5-2 Procedure of medial-surface generation.

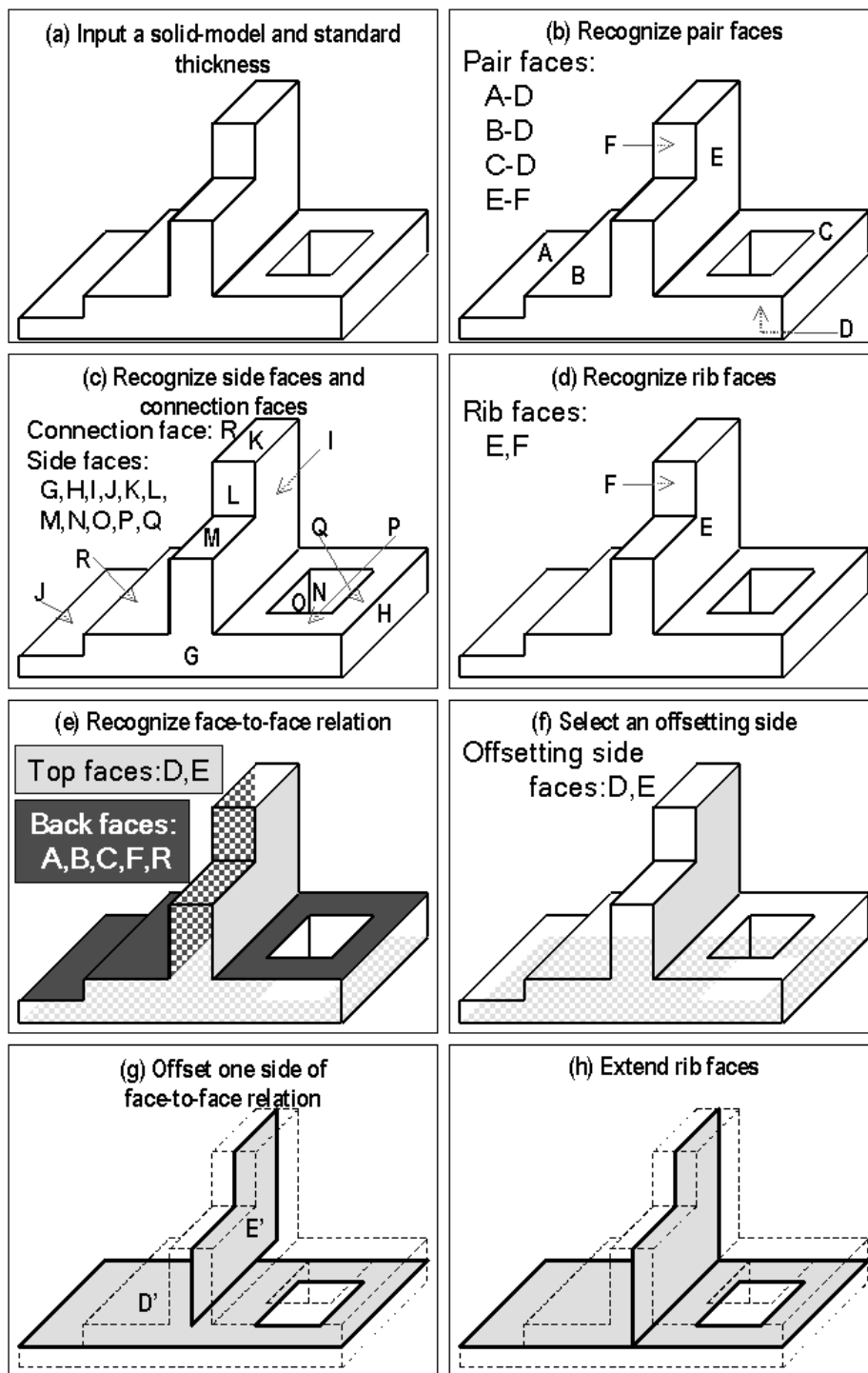


Fig. 5-3 Medial-surface model generation process.

5.3 薄板対向面の認識

面間距離が基準板厚寸法より小さい2面を探索し、この2面をペア面とする。ペア面の探索処理を Fig. 5-4 を例に説明する。

- (1) ソリッド構成面の2面（ソリッド構成面 A, B）の母曲面に対して、面 B を法線方向に押出して作成される立体と面 A の交差領域を S_A とする。（Fig. 5-4 (b)）
- (2) 領域 S_A 内に $n \times m$ 個 (n, m は正の整数) の網状の点 (P_{ij}) を算出する (Fig. 5-4 (c))。以降

この網状の点を点網と呼ぶ。

- (3) 点 P_{ij} をソリッド構成面 B に投影した点 R_{ij} を算出し、この投影ベクトルを V_{ij} 、投影距離を D_{ij} とする。(Fig. 5-4 (d))
- (4) 投影点 R_{ij} 上のソリッド構成面 B の法線ベクトル N_{ij} と投影ベクトル V_{ij} の角度 θ_{ij} を算出する。(Fig. 5-4 (d))
- (5) すべての距離 D_{ij} が指定基準板厚寸法以下かつすべての角度 θ_{ij} がしきい値以下の場合に、ソリッド構成面 A, B をペア面とする。

このように、面間距離が基準板厚とより小さく、平行に近い2面を薄板対向のペア面として登録する。

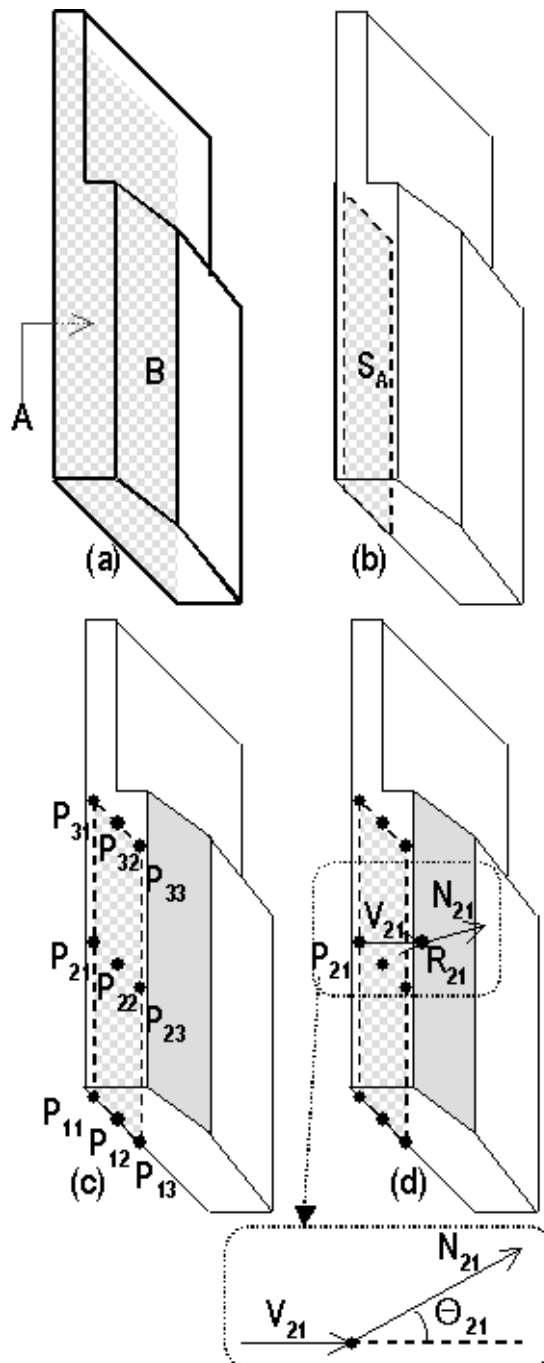


Fig. 5-4 Recognition of pair faces.

5.4 端部面と段差面の認識

ソリッドモデルにおける端部面と接続面の認識を行う。端部面とはソリッドモデルの側面となる面である。接続面とは、端部面でもペア面でもないペア面同士を接続する面であり、板厚変化部のペア面を接続する面等が該当する。端部面及び接続面の認識処理を Fig. 5-5 を用いて説明する。

- (1) ペア面以外の面において、面の境界線分から、線分間距離が基準板厚寸法より小さく、かつ線分角度が平行に近い2つ線分を算出し、この2つの線分をペア線分とする。たとえば、Fig. 5-5 の面 A では、線分 a と線分 d、線分 e と線分 i、線分 g と線分 i、面 B においては線分 j と線分 l、面 C においては線分 l と線分 k、面 E においては線分 m と線分 n がペア線分となる。
- (2) ペア線分同士で隣接する面をグルーピングする。Fig. 5-5 では面 B と面 C がペア線分 l で隣接しているので同グループとなり、面 A、面 D、面 E、面 F はそれぞれが1つずつのグループとなる。
- (3) 各グループについてペア線分が帰属する面をすべて取得し、この帰属面にペア面の2面の組が存在する場合は、このグループを端部面とする、ペア面の2面が存在しない場合は接続面とする。Fig. 5-5 の面 A ではペア線分 a, d がペア面 G-H に帰属しているので、面 A は端部面となる。面 B と面 C のグループはペア線分 j, k がペア面 G-H に帰属しているので、面 B と面 C も端部面となる。同様に面 D、面 F も端部面となる。また、面 E のペア線分は線分 n, m であるが、この線に帰属する面 J, K はペア面の関係には無いので、面 E は接続面となる。

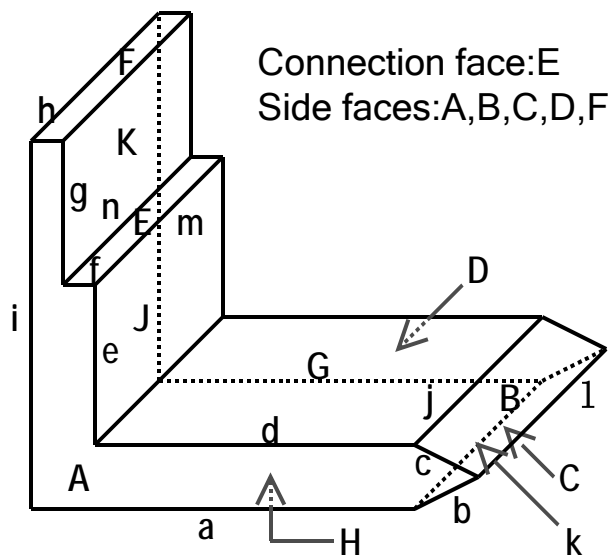


Fig. 5-5 Recognition of side faces and connection faces.

5.5 リブ面の認識

ソリッドモデルにおける各面の接続関係およびペア面の関係からリブの付根部分を判定し、これを用いてリブ面を認識する。以下にリブの認識処理を Fig. 5-6 を用いて説明する。

- (1) ソリッドモデルにおけるペア面と接続面に対して、面をノード、隣接している面を隣接エッジ、ペア面の関係にある面をペア関係エッジとして結んだグラフを作成する。以降このグラフを隣接グラフと呼ぶことにする。Fig. 5-6 (a)のソリッドモデルにおいて、ペア面及び接続面だけを取り出した図が Fig. 5-6 (b)であり、この隣接グラフは Fig. 5-6 (c)となる。
- (2) 隣接グラフからペア面の 2 面が互いに隣接エッジで結ばれている、または接続面を介して隣接エッジで結ばれている 2 つのペア面を探索し、この 2 つのペア面をグルーピングする。以下このグループをペア面グループと呼ぶ。Fig. 5-6 (c)の隣接グラフにおけるペア面グループは Fig. 5-6 (d)のように《B-C-M-L-K》、《A-B-F-E-D》、《G-H-H》となる。
- (3) それぞれのペア面グループ間を結合している隣接エッジを抽出し、この隣接エッジで結ばれているノードが帰属する面がリブの付根部である。Fig. 5-6 (d) では面 G と面 F、面 J と面 K がリブの付根部であると認識できる。

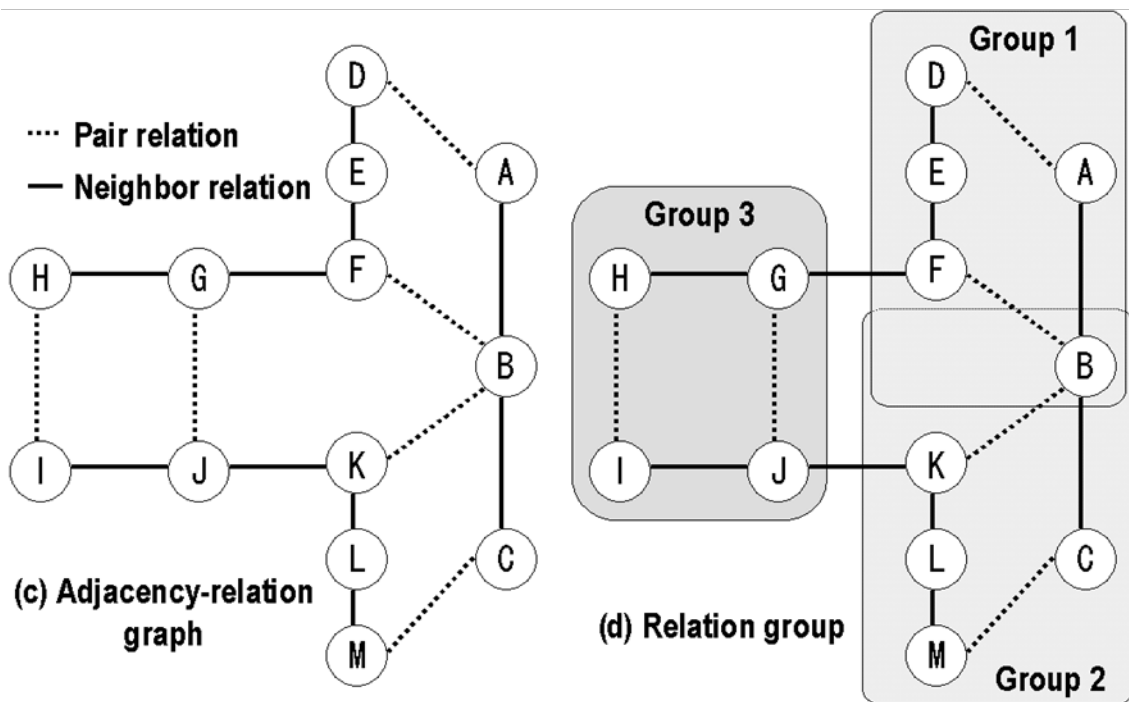
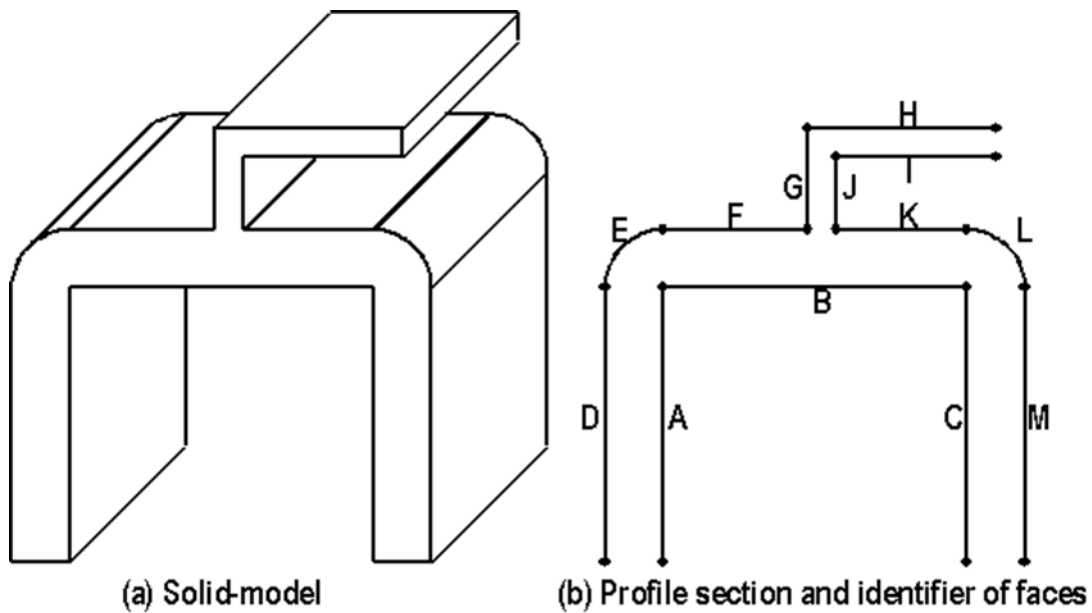


Fig. 5-6 Recognition of rib faces.

5.6 対向面グループの認識

前述のリブ面認識時に認識したペア面グループの単位で、薄板部の対向関係にある面グループを認識する。Fig. 5-6 を用いて対向関係の認識処理を説明する。

- (4) 同じ面を参照している 2 つのペア面グループがあれば、それを統合化する。
- (5) 対象ペア面グループ内の面に対して、隣接関係にある面同士をグルーピングする。以下、このグループを接続グループと呼ぶ。
- (6) 対象ペア面グループ内の接続グループの数が 2 個であれば処理を終了する。2 個を超える場合は 2 個になるまで、下記(4)の処理を繰り返し実行する。ここで、2 個の接続グループの内、

一方を表側面，もう一方を裏側面と呼ぶ。

- (7) 全接続グループから任意の1つのグループを抽出し，この接続グループ内のある任意の面とペア面になっている面が含まれる接続グループを抽出し，この2つの接続グループを1つに統合化する。

上述の(1)～(4)の処理をペア面グループの単位ですべてのペア面グループに対して実行する。例えば Fig. 5-6 (a)のソリッドモデルにおいて，ペア面グループは前述のとおり《B-C-M-L-K》，《A-B-F-E-D》，《G-J-I-H》である。この内，《B-C-M-L-K》，《A-B-F-E-D》は同じ面Bを参照しているため《B-C-M-L-K》，《A-B-F-E-D》は同じペア面グループとして統合化する。従って，ペア面グループは面A，面B，面C，面D，面E，面F，面K，面L，面Mとなる。次に，このペア面グループ内の面に対して，隣接関係にある面同士を接続グループとして，グルーピングする。この結果，下記の3つの接続グループになる。

接続グループ1；A，B，C

接続グループ2；D，E，F

接続グループ3；K，L，M

ここで，ペア面の関係に基づいて接続グループの統合化を行う。面F，面Kは面Bとペアになっている。従って，面F，面Kが含まれる接続グループ2，3は1つに統合化される。その結果2つの接続グループになり，下記のような表側面，裏側面となる。

表側面；A，B，C

裏側面；D，E，F，K，L，M

同様にペア面グループ《G-J-I-H》に対しても処理する。その結果，下記のような表側面，裏側面となる。

表側面；G，H

裏側面；I，J

5.7 オフセット面生成

表側面または裏側面の一方の面群をソリッドモデルの内部方向にオフセットする。オフセットする面群(表側面，裏側面)は操作者が指定する。オフセット距離は5.2節の薄板対向面の認識にて示したペア面間距離の最大値/最小値/平均値のいずれかの1/2の値，もしくは操作者の指定する値である。また，オフセットする面群とオフセット距離はペア面グループごとに指定可能である。なお，面群のオフセット処理技術については既に市販三次元CADの多くに実装されているので，本論では説明しない。詳細は参考文献(Piegl and Tiller, 1999) (Forsyth, 1995) (Farouki, 1986)を参照されたい。

Fig. 5-6 (a)のソリッドモデルに対して，表側面をオフセットした結果が Fig. 5-7 (a)，裏側面をオフセットした結果が Fig. 5-7 (b)となる。また，5.1節および Fig. 5-1 で説明したとおり解析に必要な中立面モデルの形状は境界条件等の解析種類によって異なる。本技術では中立面モデル作成基準

面として表側面または裏側面を指定することで、中立面モデルの形状を制御できる、例えば Fig. 5-1 (a) のソリッドモデルにおいて、上面側（段差がある側）が表側面、下面側（段差が無い側）が裏側面とした場合、表側面を基準に中立面モデルを作成すると Fig. 5-1 (b) の中立面モデルになり、裏側面を基準に中立面モデルを作成すると Fig. 5-1 (c) の中立面モデルとなる。

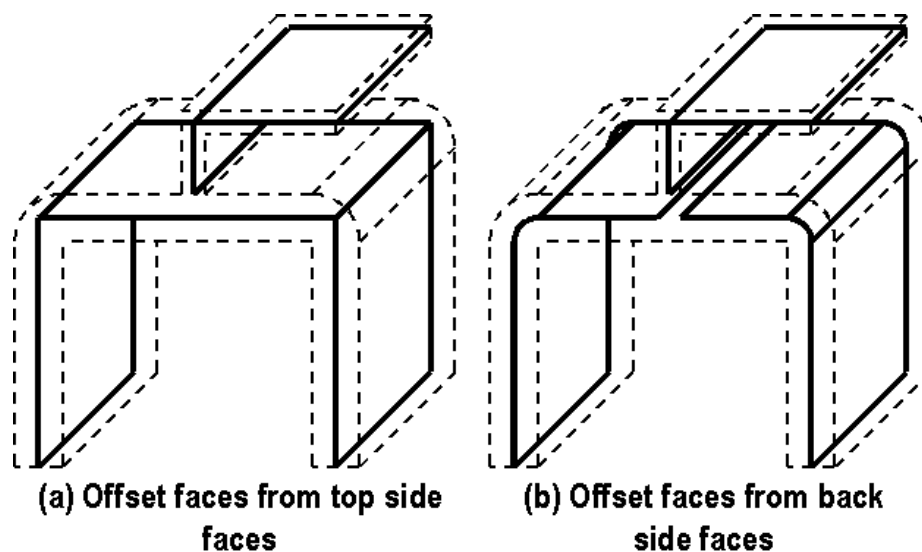


Fig. 5-7 Selection of offset side.

5.8 リブ面の延長

Fig. 5-7 のようにオフセットしただけでは、リブの付根部分で面が離れる。そこで、リブの付根部分の面からオフセットされた面を、この面と接続関係にある面もしくはリブ面と接続関係にある面のペア面からオフセットされた面まで延長する。また、リブ面に隣接している一般面も同様に延長する。処理方法を以下に説明する。

- (1) 各オフセット面をノード、オフセット元のソリッドモデルの面が隣接している面同士を隣接エッジとして結んだグラフを作成する。本技術ではこのグラフを中立面モデル隣接グラフと呼ぶ。
- (2) 任意の 2 つのオフセット面において、一方の面のオフセット元ソリッドモデル面が帰属するペア面と、もう一方のオフセット元ソリッドモデル面が帰属するペア面が隣接関係にある、もしくは同じ面を参照している場合、この 2 つのオフセット面を、中立面モデル隣接グラフに対してペア関係エッジで結ぶ。
- (3) 隣接エッジ及び、ペア関係エッジで結合されており、オフセット面が接続していない 2 面を探索する。ここで接続していない 2 面とは、位相的にも幾何的にも接続していない 2 面のことである。
- (4) この 2 面が互いに接続するまで延長し、結合する。

Fig. 5-8 にその一例を示す。Fig. 5-8 (a) は図 6 に示したソリッドモデルと同じである。なお、各

面の識別子も Fig. 5-6 と同様の識別子を用いることとし， Fig. 5-8 には特に記載しない．また， Fig. 5-8 (b) も Fig. 5-6 のソリッドモデルに対して裏側面をオフセットして作成した中立面モデル Fig. 5-7 (b) と同一である．まず，面 D' と面 E' はオフセット元ソリッドモデル面が隣接しているので，隣接関係エッジで結んだ中立面モデル隣接グラフを作成する．面 E' と面 F' ，面 M' と面 L' ，面 L' と面 K' ，面 I' と面 J' も同様に隣接しているので隣接関係エッジで結ぶ．次に，面 J' と面 F' は，面 J' のオフセット元ソリッドモデル面が帰属するペア面 G-J と面 F' のオフセット元ソリッドモデル面が帰属するペア面 F-B において，面 F と面 G が隣接関係にあるので，面 J' と面 F' をペア関係エッジで結ぶ．面 F' と面 K' も同様にオフセット元ソリッドモデル面が帰属するペア面が同じ面を参照しているので隣接関係エッジとして結ぶ．この結果， Fig. 5-8 (d) に示す中立面モデル隣接グラフになる．ここで，オフセット面 J' に注目する．面 J' は面 F' ，面 K' ，面 I' と隣接エッジまたはペア関係エッジで結ばれているが，実際には面 F' ，面 K' と接続していないので，これらの面を互いに幾何的に接続するまで延長する．この結果， Fig. 5-8 (c) に示すモデルとなる．

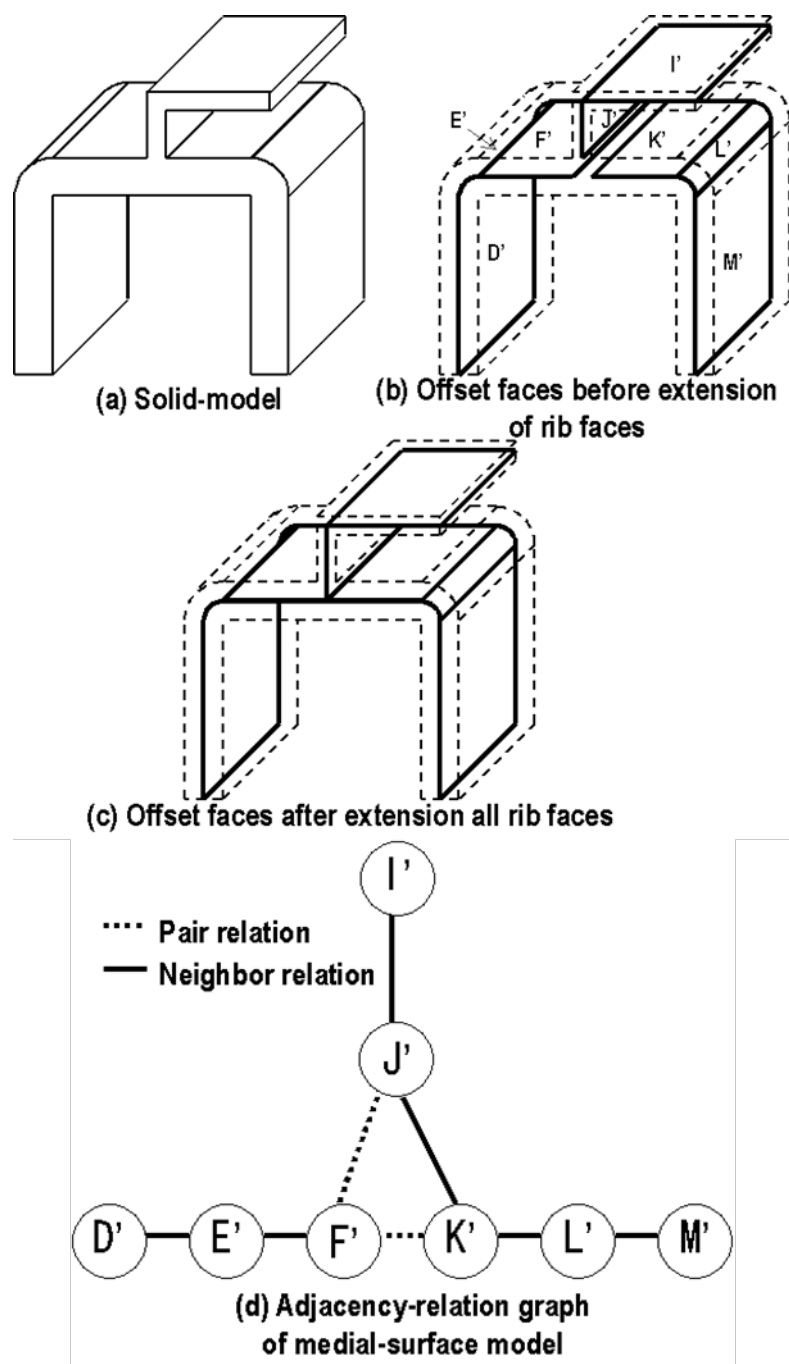


Fig. 5-8 Extension of rib faces.

5.9 板厚寸法の設定

中立面モデルを用いて有限要素法による解析を実施するためには、各面に対して厚み属性（板厚寸法）を設定する必要がある。そこで、本技術ではソリッドモデルのペア面の情報に着目し各面に板厚寸法を自動付与することとした。すなわち、各ペア面の面間距離を、このペア面から作成された面に対して、板厚寸法として付与する。なお、ペア面の面間距離が一定でない場合はペア面認識処理時(5.2節記載)の各点網における投影距離の平均値を面間距離とする。これにより、中立面モデル生成後に改めて板厚寸法を入力する必要がなく、より効率的に解析を実施できる。

5.10 中立面モデルの形状制御

5.1 節および Fig. 5-1 で説明したとおり，同じソリッドモデルでも解析の種類によって，必要な中立面モデルの形状は異なる．本技術では中立面モデルの作成基準面を指定することで，中立面モデルの形状を制御できることを 5.6 節で説明した．本技術ではさらに，自動的に認識した薄板部の面の対向関係について，この対向関係を変更する面のみ指定することで，中立面モデルの形状を制御することが可能である．その一例を図 9 に示す，図 9 (a) が対象のソリッドモデルである，このソリッドモデルに対する中立面モデルの形状を考えた場合，図 9(b)もしくは図 9 (c) の中立面モデルが候補となる．これは，一般的に，シェルメッシュによる解析では面内に曲げが発生すると解析精度が悪くなるので，ソリッドモデル下部の Y 字型部分のように薄板部の対向関係が複数ある部位については，この部位における力の作用方向によって中立面モデルの形状を決めることが望ましいためである．本技術による，この 2 種類の中立面モデルの生成方法を説明する．なお，基準板厚寸法は，d2 を入力したとして説明する．まず，第 2 章で説明した方法で薄板部の対向面グループを認識すると，表側面，裏側面は下記ようになる．

表側面：面 A, C, E, G, J

裏側面：面 B, D, F, H, I

この表側面を基準に中立面モデルを作成すると図 9 (b) に示すモデルとなる．ここで，表側面，裏側面を下記になるように変更する部分だけを指定する．

表側面：面 A, C, L

裏側面：面 B, D, K

すなわち，面 L と面 K をそれぞれ表側面，裏側面として指定し，面 E, G, J, F, H, I を表側面，裏側面から解除する．この表側面群を基準に中立面モデルを作成すると図 9 (c) に示すモデルとなる．このように，本技術では薄板部の面の対向関係を指定することで，中立面モデルの形状を制御可能である．すなわち，解析の用途に合わせて，解析モデルとして等価な中立面を作成できる．また，表側面及び裏側面の認識が操作者の望むものと多少異なったとしても，対向関係を指定することで修正することができるので，任意のソリッドモデルから中立面モデルを作成することが可能である．

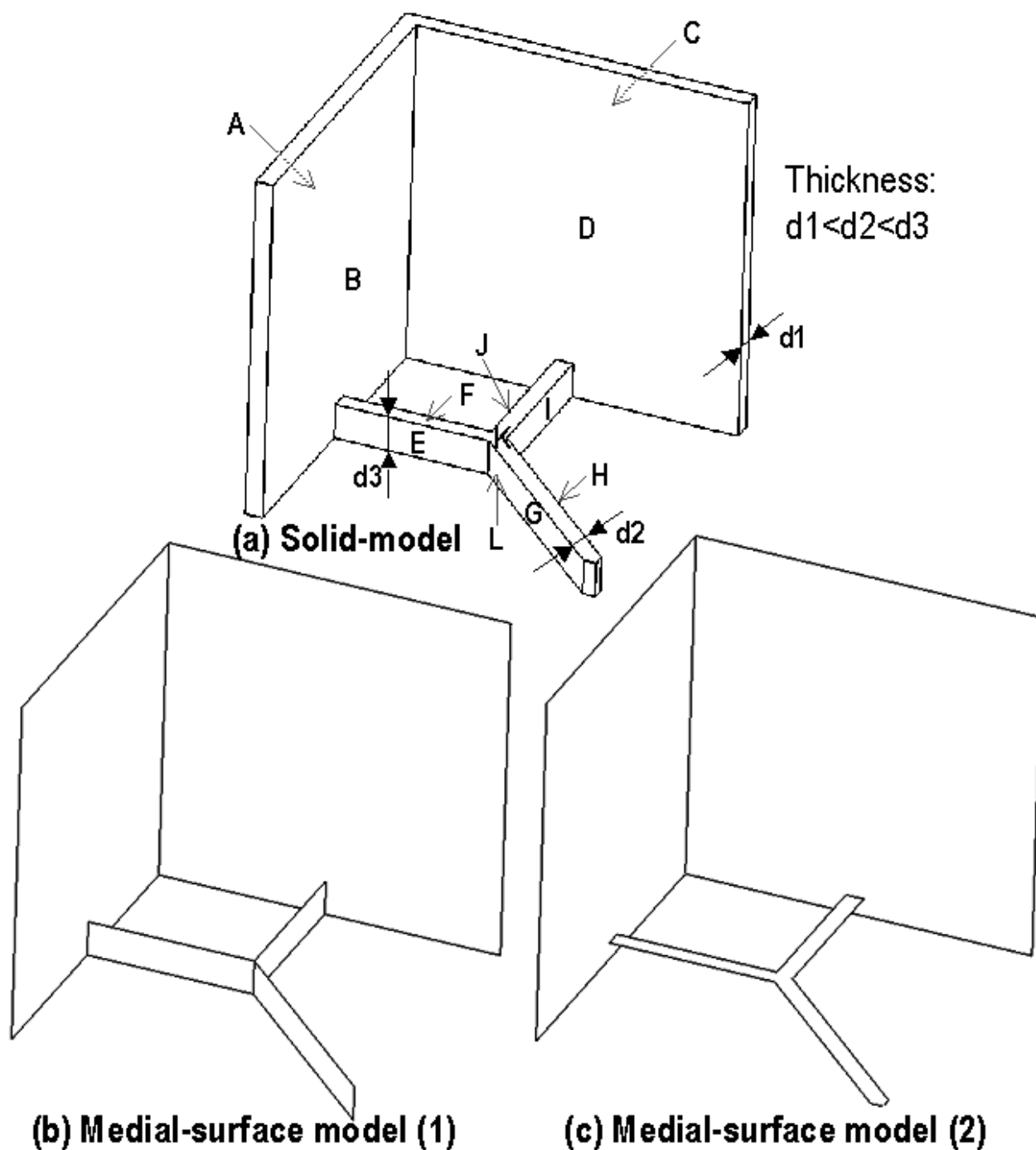


Fig. 5-9 Control of medial-surface model shape.

5.11 中立面生成技術の検証

本技術を適用した例を Fig. 5-10 と Fig. 5-11 に示す. Fig. 5-10 (a) はブラケット部品のソリッドモデルである. このソリッドモデルには丸囲み部分に段差があるため, 解析種類に応じて中立面モデルの形状が異なる, これに対して, 本技術によって認識した表側面, 裏側面がそれぞれ, Fig. 5-10 (b), Fig. 5-10 (c) の塗りつぶしされている面である, 表側面を基準に作成した中立面モデルが Fig. 5-10(d)である. また, 中立面モデルの作成基準面を裏側面に切り替えることで Fig. 5-10 (e) の中立面モデルも作成可能である. このように, 中立面モデルの作成基準面を切り替えるだけで中立面モ

デルの形状を制御できる。なお、このブラケット部品の中立面モデルを作成に要した処理時間は約1分である(Pentium4 2.0GHz 使用)。次に、携帯電話上カバーでの検証例を Fig. 5-11 に示す。Fig. 5-11 (a)はソリッドモデルを前側から見た図であり、Fig. 5-11(b)は後側から見た図である。このソリッドモデルには8つのリブが含まれる (Fig. 5-11 (c))。これに対して作成した中立面モデルを前側から見た図が Fig. 5-11 (d) であり、後側から見た図が Fig. 5-11 (e) である。リブ部の拡大図 (図 11) が示すとおり、リブ部にも正確な中立面モデルが作成されていることを確認できる。なお、この携帯電話モデルに対し、中立面モデルを作成するために要した処理時間は約3分である(Pentium4 2.0GHz 使用)。このように、本技術ではソリッドモデルにおける各面の接続関係、及びペア面の関係に基づき、リブを認識しているため、正確に接続した中立面モデルを作成できる。また、薄板部の面の対向関係を指定することで、中立面モデルの形状を制御可能であるため、解析の用途に合わせて、解析モデルとして等価な中立面を作成できる。

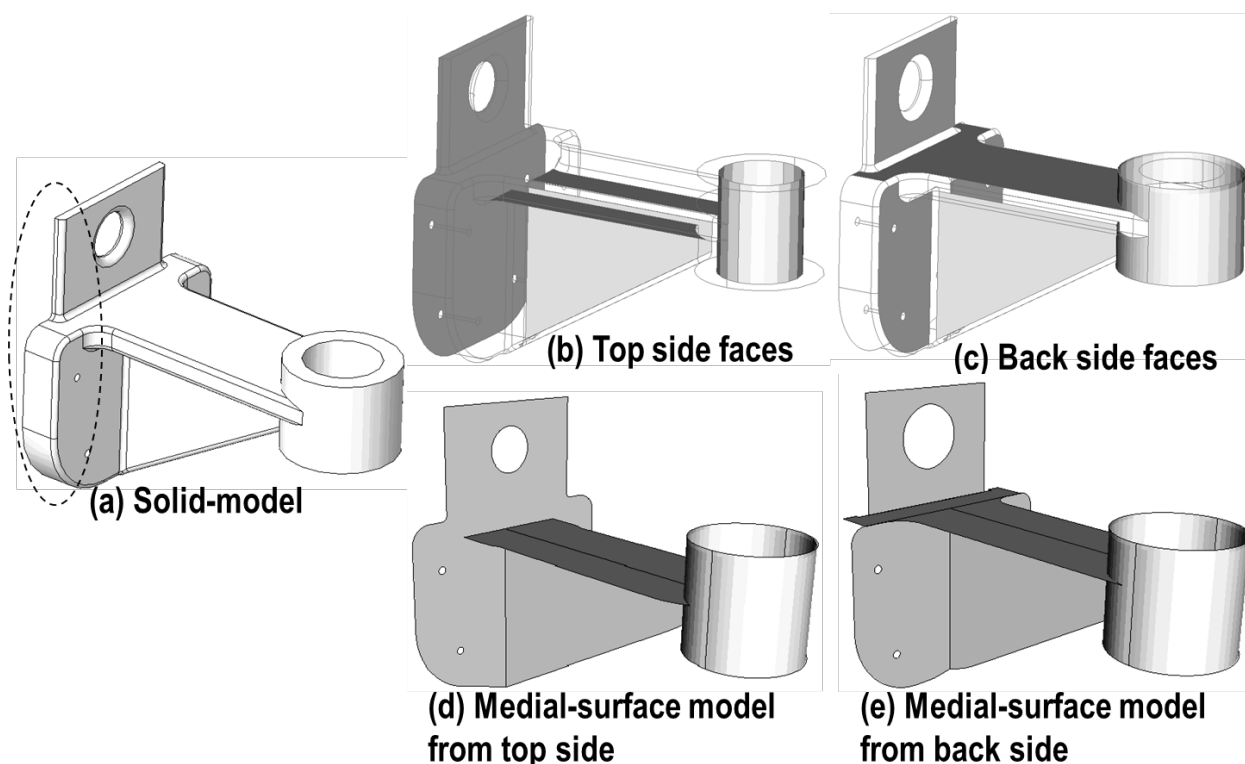


Fig. 5-10 Example of a bracket model.

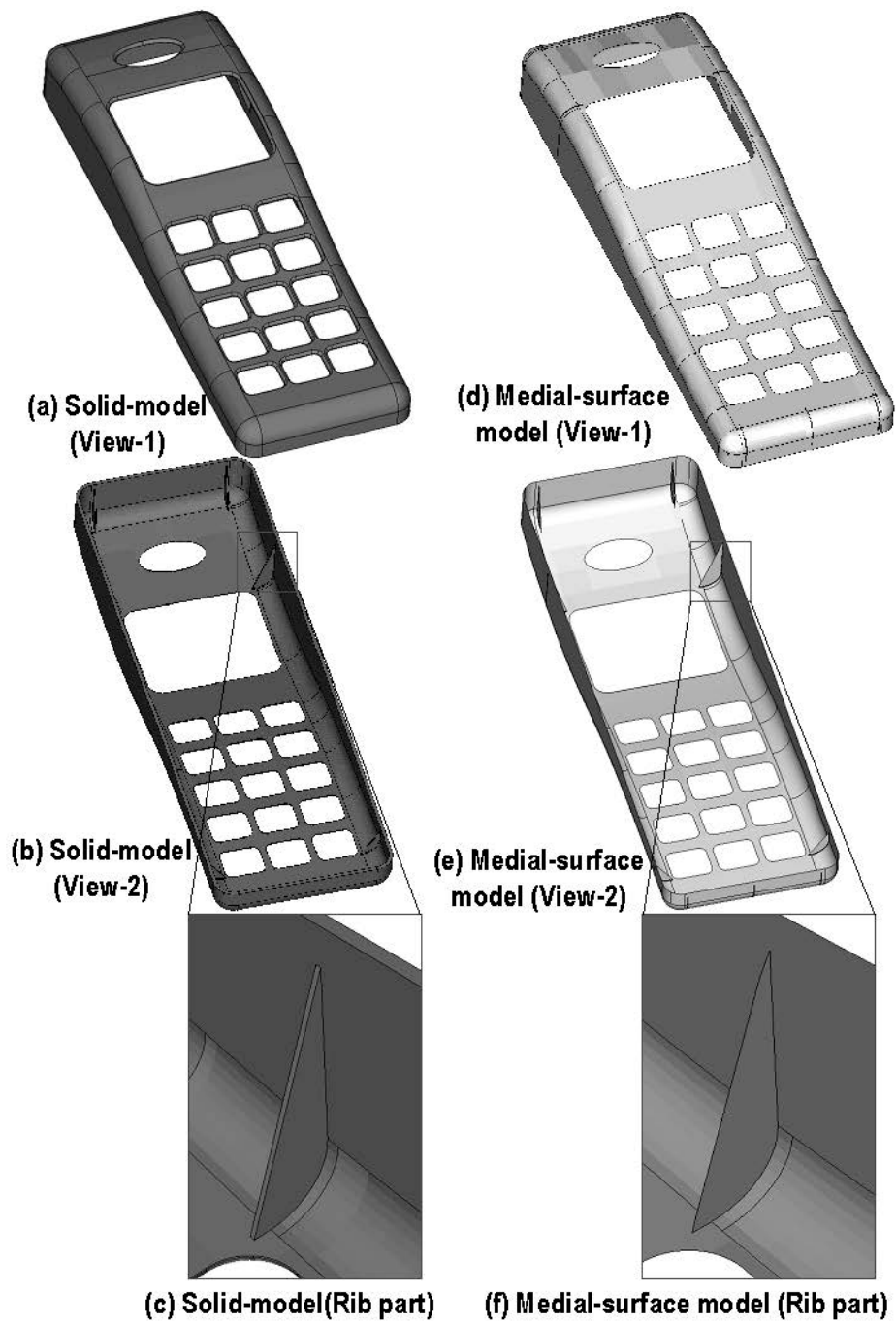


Fig. 5-11 Example of a cellular phone cover model.

6. メッシュモーフィング技術

6.1 メッシュモーフィング技術の課題

これまでにメッシュモーフィング技術として、Freeform morphing や Control based approach 等の技術(d'Ippolito et al., 2006) (Van der Auweraer et al., 2006) (Yoon and Kim, 2006)が提案されている。これらの技術は従来、CG(Computer Graphics)の分野で研究されてきた形状変形技術の応用技術である。Freeform morphing 技術はメッシュを構成する節点に対して、固定領域、可動領域、移動制御領域を指定し、ポインティングデバイス等の移動に追従して、メッシュ全体を変形させる方法である。変形方法としては、並進方向変形、回転変形、スケーリング変形等が可能である。Control based approach 技術は解析メッシュの一部を囲む制御ブロックを作成し、制御ブロックの変形操作に追従して、制御ブロックに内包されている節点を移動し、メッシュを変形する方法である。

両技術共に自由な変形が必要とされるCGアニメーションの作成支援等で活用されている。但し、工業製品の設計支援に幅広く適用するためには、解決すべき課題が存在する。工業製品の形状は一般的に平面や円筒面などの機械加工に適した面が多く、それらは平面間の距離や円筒面の径などの寸法拘束と平行/垂直や接線連続などの幾何拘束の拘束条件で定義される。従って、工業製品の形状変形には曲面の種類やパラメータおよび拘束条件を満たす必要がある。例えば、ボルト穴等の円筒形であけた穴は円筒形とその径を保持したまま変形を行う必要がある。しかし、従来技術はこれらの制約を厳密に満たすような正確な位置決めを行うことが困難であることが知られている(Sorkine, 2004)。一例を Fig. 6-1 に示す(以降、説明を単純にするために二次元図で説明する)。Fig. 6-1 (a)のメッシュに対して全長を変更したい場合、Freeform morphing や Control based approach 等の従来技術では Fig. 6-1 (b)のように穴は楕円穴になり好ましくない。Fig. 6-1 (c)のように円形(円筒面)を保持しつつ変形する必要がある。

そこで、本研究では従来技術の課題を解決するために、平面や円筒面などの面(以下、幾何特徴と呼ぶ)と拘束条件に基づいてメッシュを変形する開発してきた。

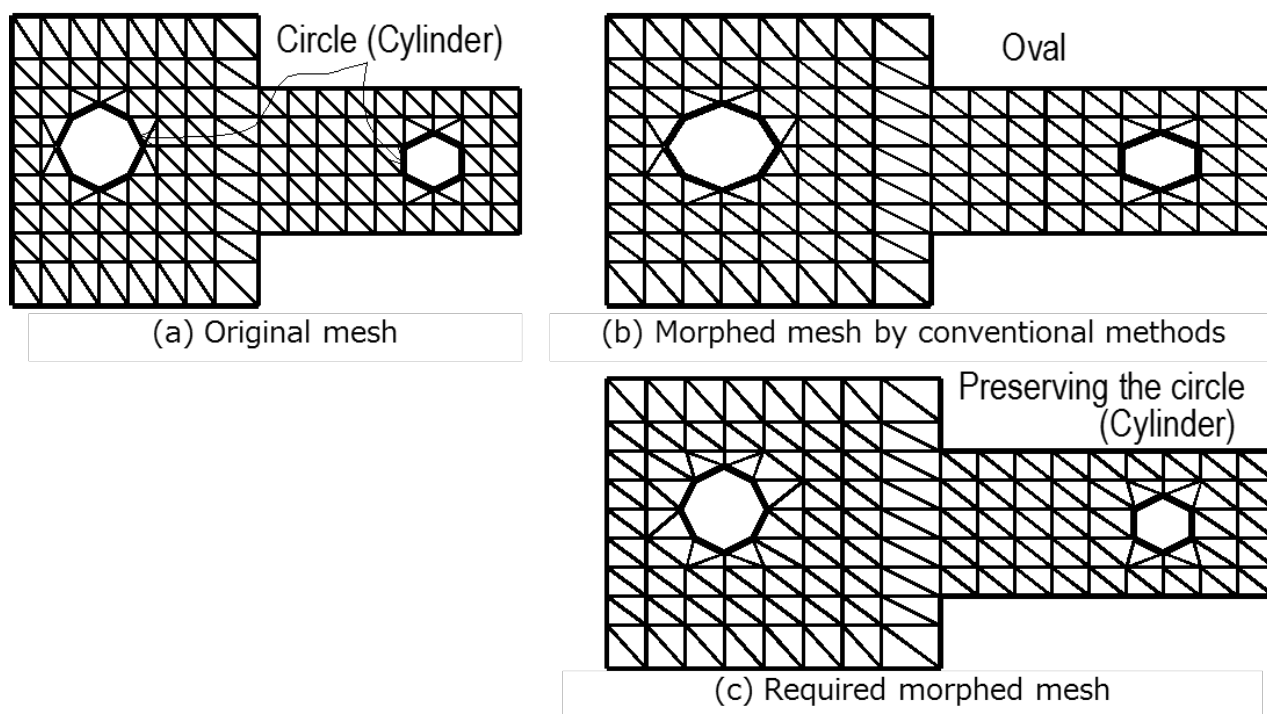


Fig. 6-1 Mesh morphing preserves original geometric features.

6.2 解決手段の概要

本研究では、前節で示した課題を解決するために、Fig. 6-2 に示すような、メッシュに対して曲面の種類やパラメータおよび寸法拘束や幾何拘束を付与し、この寸法拘束や幾何拘束を保持したまま、寸法変更(Fig. 6-2(b))や、フィーチャの追加や削除(Fig. 6-2(c))、指定形状へのフィッティング(Fig. 6-2(d))を行うことでメッシュを変形できるメッシュモーフィング技術を開発した。また、メッシュモーフィングは基本的に節点を移動することで変形を実現しているため、要素の大きさと比較して変形量が多い場合に、要素の伸び縮みが大きくなり要素品質が悪化し、場合によっては体積が負になる反転した要素が発生することもある。そこで、メッシュモーフィング向けの要素品質改善技術も開発した(Fig. 6-2(e)(f))。

具体的には、メッシュの外表面の要素面に対して幾何特徴として曲面の種類(平面や円筒面など)やパラメータ(中心軸や頂点など)、および幾何拘束として幾何特徴間の関係(平行/垂直や接線連続)を自動認識し、この幾何特徴または幾何特徴間に対して変形後形状の寸法値(寸法拘束)を指示し、この幾何特徴と幾何拘束、寸法拘束を制約としてメッシュを変形させる。さらにフィーチャの追加・削除や、指定形状へのフィッティングを行うことで、メッシュを変形させる。すなわち、本技術は、従来技術では実現が困難であった幾何特徴を保持しつつ、指示された寸法拘束を満たすようにメッシュを変形できる。また、寸法拘束は設計における形状を定義するための設計パラメータであり、この設計パラメータを直接指示しメッシュを変形できるので設計意図を反映しやすいという利点もある。

例えば、Fig. 6-1 (a)のメッシュに対して全長を変更した場合、穴は円筒面として認識され、変形後もこれを保持するので、Fig. 6-1 (c)のメッシュを得ることができる。

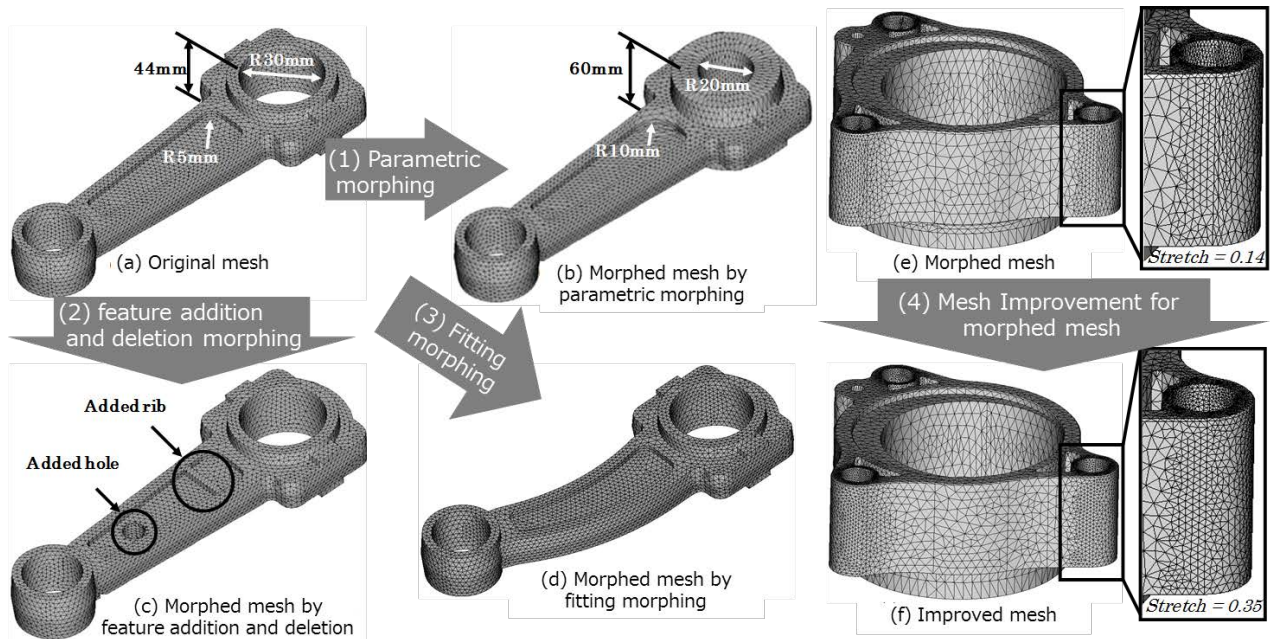


Fig. 6-2 Developed mesh morphing technique.

6.3 幾何特徴認識

6.3.1 概要

幾何特徴認識技術ではメッシュの外表面の要素面(表面三角形)から幾何特徴を認識する。具体的には表面三角形を同一の幾何特徴上にあるもの同士に分類し、幾何特徴と表面三角形を対応付ける。

本研究では認識の対象とする幾何特徴の種類として、平面、円筒面、円錐面、球面を認識の対象とし、これらに該当しない部分は自由曲面として認識することとした。尚、本報では円筒面、円錐面、球面をまとめて二次曲面と呼んでいる。これまでにも、表面三角形から幾何特徴を抽出し分類する技術の研究が行われてきた。その主な方法として Marshall らの方法(Marshall, 2001)がある。これは、基準となる節点および認識の対象とする幾何特徴の種類(例えば、円筒面、球面、平面)を対話的に指定し、基準節点とその周辺の節点群の座標値から最小二乗法により幾何特徴のパラメータを計算し、基準節点から領域を拡張していきながらこの幾何特徴に含まれる表面三角形を抽出する方法である。尚、以降の図では基準節点を *seed node* と表記する。本研究では、基準節点の選択と領域抽出を自動的に行うための適切なパラメータ、および幾何特徴を分類する手法を検討した。

6.3.2 基準節点自動選択方法の検討

幾何特徴認識の対象は三角形データの集合である。すなわち、節点と三角形および、この接続関係のデータから基準節点を選択する必要がある。なお、四角形メッシュの場合は、これを二つの三

角形に分割，六面体メッシュの場合は，表面四角形を二つの三角形に分割することで，各種のメッシュに対応できる．

ここで，節点と帰属する三角形の関係を表現するパラメータとして「立体角」，「平面性」，「曲率」，「曲率の差」の4つパラメータに着目し，複数の検証モデルを用いて適切なパラメータを導出することとした．この4つのパラメータとこのパラメータに基づいた基準節点を選択する順番を下記(1)～(4)に示す．

(1) 立体角：立体角(Fig. 6-3(a))が 2π に近い順に基準節点を選択

(立体角とは，半径1の球面を，対象点から見た空間部で切り取った領域の面積，である)

(2) 平面性：対象節点が帰属する要素面の中間平面の法線ベクトルとこれら要素面の法線ベクトルの最大角度(Fig. 6-3 (b))が小さい順に基準節点を選択

(3) 曲率：曲率(Fig. 6-3 (c))が小さい順に基準節点を選択

(4) 曲率の差：隣接節点との曲率の差(Fig. 6-3 (d))が小さい順に基準節点を選択

また，領域抽出時の幾何特徴に含まれる表面三角形の抽出方法としては，式(6-1)により対象幾何特徴と対象表面三角形の最大距離と，上記(1)～(4)のパラメータの変動量(対象表面三角形を対象幾何特徴に追加する前後の幾何パラメータの差)を正規化した値の比 D がしきい値以下になる場合に領域に追加することとした．

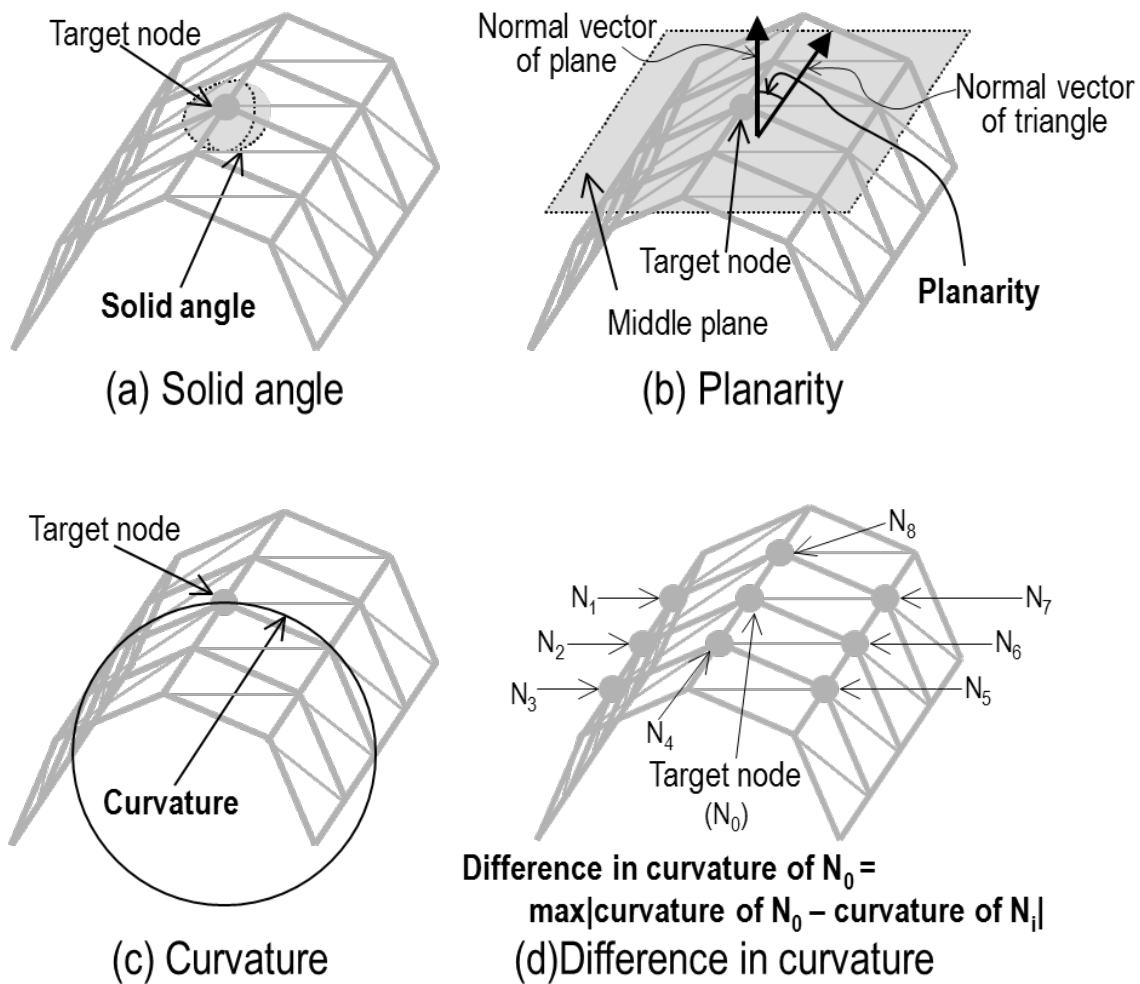


Fig. 6-3 Examining parameters for selecting the seed node.

$$D = \frac{d}{1.0 - |(v_0 - v_1)/v_{max}|} \quad (6-1)$$

- d : 対象幾何特徴と対象表面三角形の最大距離(Fig. 6-4)
- v_0 : 対象幾何特徴内における隣接節点間での対象パラメータの差の最大値
- v_1 : 追加対象表面三角形の節点と、隣接節点での対象パラメータの差の最大値
- v_{max} : 対象メッシュ全体における隣接節点間での対象パラメータの差の最大値

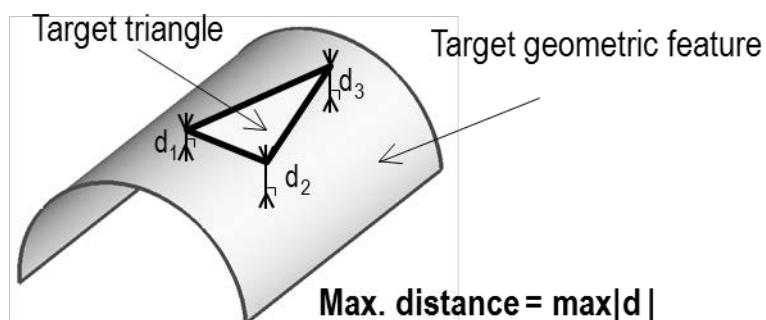
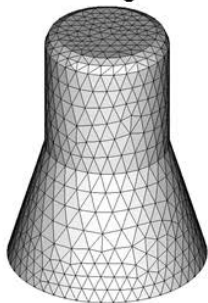

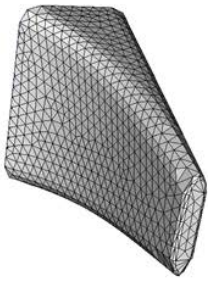
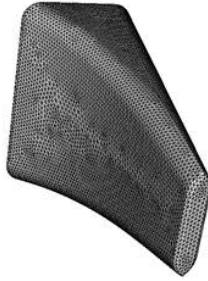


Fig. 6-4 Maximum distance between geometric feature and triangle.

検証モデルとしては、平面、二次曲面、自由曲面と表面三角形と対応がついたメッシュを準備し、この検証モデルに対して、本手法により認識した幾何特徴とずれが発生した表面三角形の数を認識精度の指標として分析した。検証モデルは2種類の形状に対して、メッシュサイズが異なる2モデルの、合計4モデルで分析した。この結果を Table 6-1 に示す。Table 6-1 は検証モデルに対して、各パラメータ毎にずれが発生した表面三角形の数(Number)と、全体表面三角形数との比(Ratio)を記したものである。最も認識精度が良いパターンは曲率の差を採用した場合であることがわかった。これは曲率が変化する部分は幾何特徴の境界であることが多く、この境界を避けて基準節点を選択し、さらに境界をまたがないように領域を抽出されているためである。そこで、本手法では、曲率の差が小さい順に基準節点を選択することとした。

Table 6-1 Result of parameter study for selecting reference node

Type of Parameter	Model 1				Model 2			
	Rough		Fine		Rough		Fine	
								
Misdirected triangles		Misdirected triangles		Misdirected triangles		Misdirected triangles		
	Number	Ratio	Number	Ratio	Number	Ratio	Number	Ratio
Solid angle	2	0.11%	6	0.05%	2	0.08%	12	0.06%
Planarity	0	0.00%	4	0.04%	1	0.04%	6	0.03%
Curvature	0	0.00%	3	0.03%	0	0.00%	5	0.03%
Difference in curvature	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	2	0.01%

6.3.3 幾何特徴認識の処理手順

幾何特徴認識処理手順を Fig. 6-5 のフローチャートに示す。Fig. 6-6 を例として説明する。Fig. 6-5 (a)が処理全体のフローチャートであり、「Step3 平面の認識処理」の詳細が Fig. 6-5 (b), 「Step4 二次曲面の認識処理」の詳細が Fig. 6-5 (c), 「Step5 自由曲面の認識処理」の詳細が Fig. 6-5 (d)である。まず、Fig. 6-6 (a)のように未認識節点における隣接節点との曲率の差が小さい節点を基準節点

とし(Fig. 6-5 (a)[Step 2]), 平面, 二次曲面, 自由曲面の順に認識処理を実行する(Fig. 6-5 (a)[Step 3~5]). 平面として基準節点に隣接する節点群から平面のパラメータを算出し(Fig. 6-5 (b) [Step3.1]), Fig. 6-6 (b)のように基準節点に隣接する節点から順に領域を大きくしながら, 式(1)により算出した値Dがしきい値以下の節点を探索していく(Fig. 6-5 (b)[Step3.3~3.4]). この結果を Fig. 6-6 (c)に示す. 平面の認識を繰り返す, 認識される平面がなくなった時点(Fig. 6-6 (d))で, 二次曲面の認識に移る. 二次曲面認識も平面認識と基本的には同じであり, 基準節点に隣接する節点群から二次曲面のパラメータを算出し(Fig. 6-5 (c)[Step4.1]), [Step4.2]), 基準節点に隣接する節点から順に領域を大きくしながら二次曲面上の節点を探索していく(Fig. 6-5 (c)[Step4.4~4.6]). この結果を Fig. 6-6 (f)に示す. 二次曲面の認識を繰り返す, 認識される二次曲面がなくなった時点(Fig. 6-6 (g))で, 自由曲面の認識に移る. 自由曲面は, Fig. 6-6 (i)~(h)のように基準節点が帰属する要素面を抽出し(Fig. 6-5 (d) [Step5.1]), この要素面とこの要素面に隣接する要素面の法線ベクトルの角度がしきい値以下の場合に, この隣接要素面の構成節点を自由曲面上の節点として登録し, さらに, 基準節点に要素面から隣接している順に領域を大きくしながら探索する(Fig. 6-5 (d) [Step5.3~5.4]). 幾何特徴認識の最終結果を Fig. 6-6 (j)に示す.

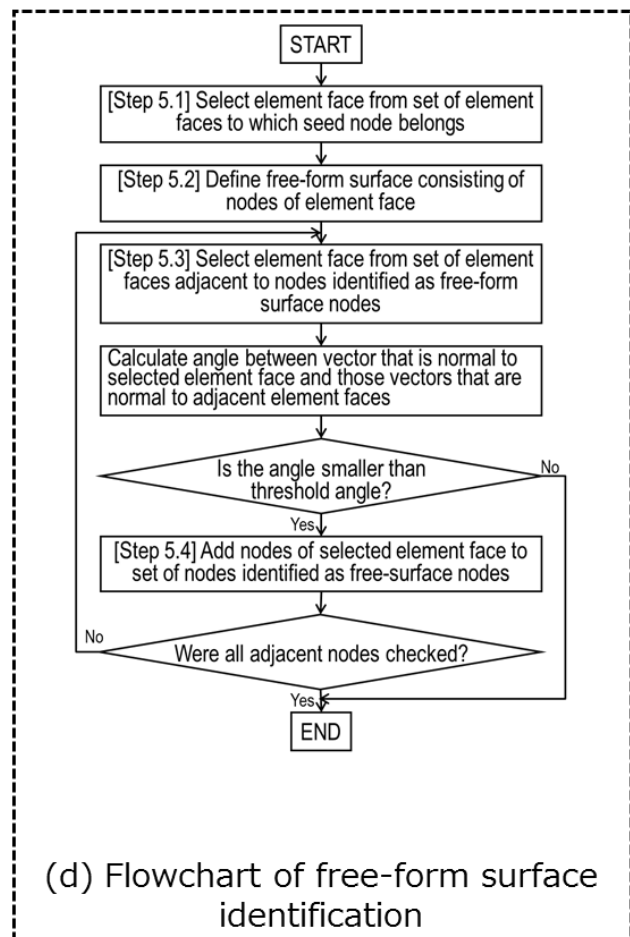
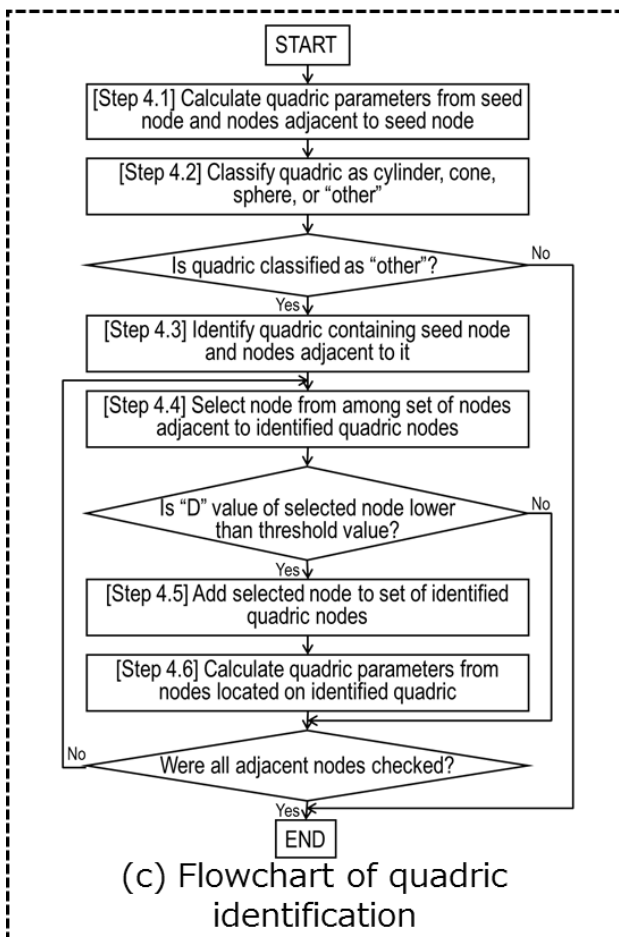
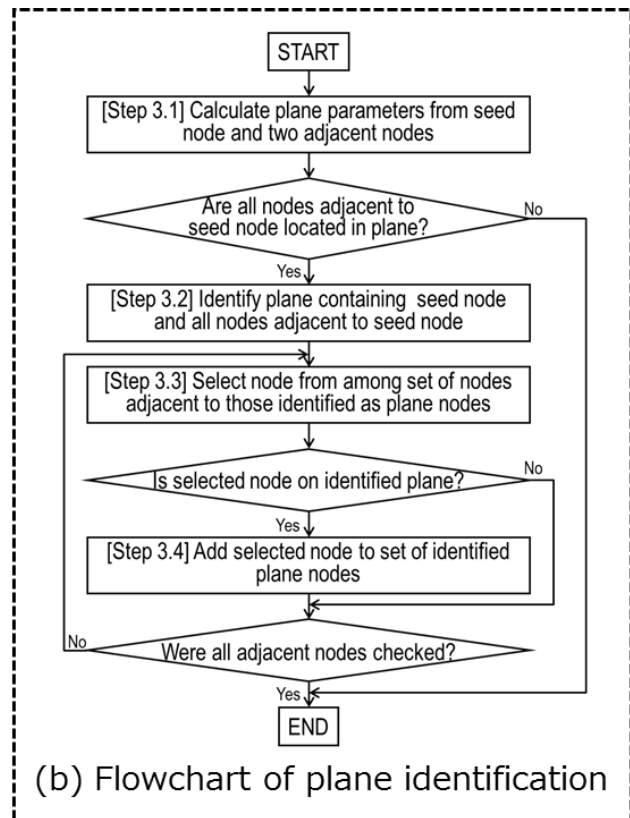
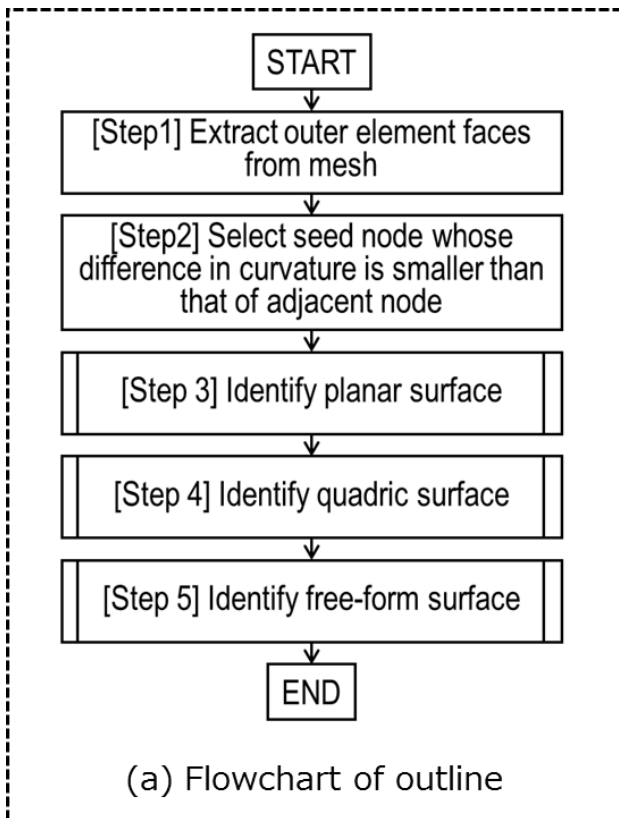


Fig. 6-5 Process flow chart for geometric feature identification.

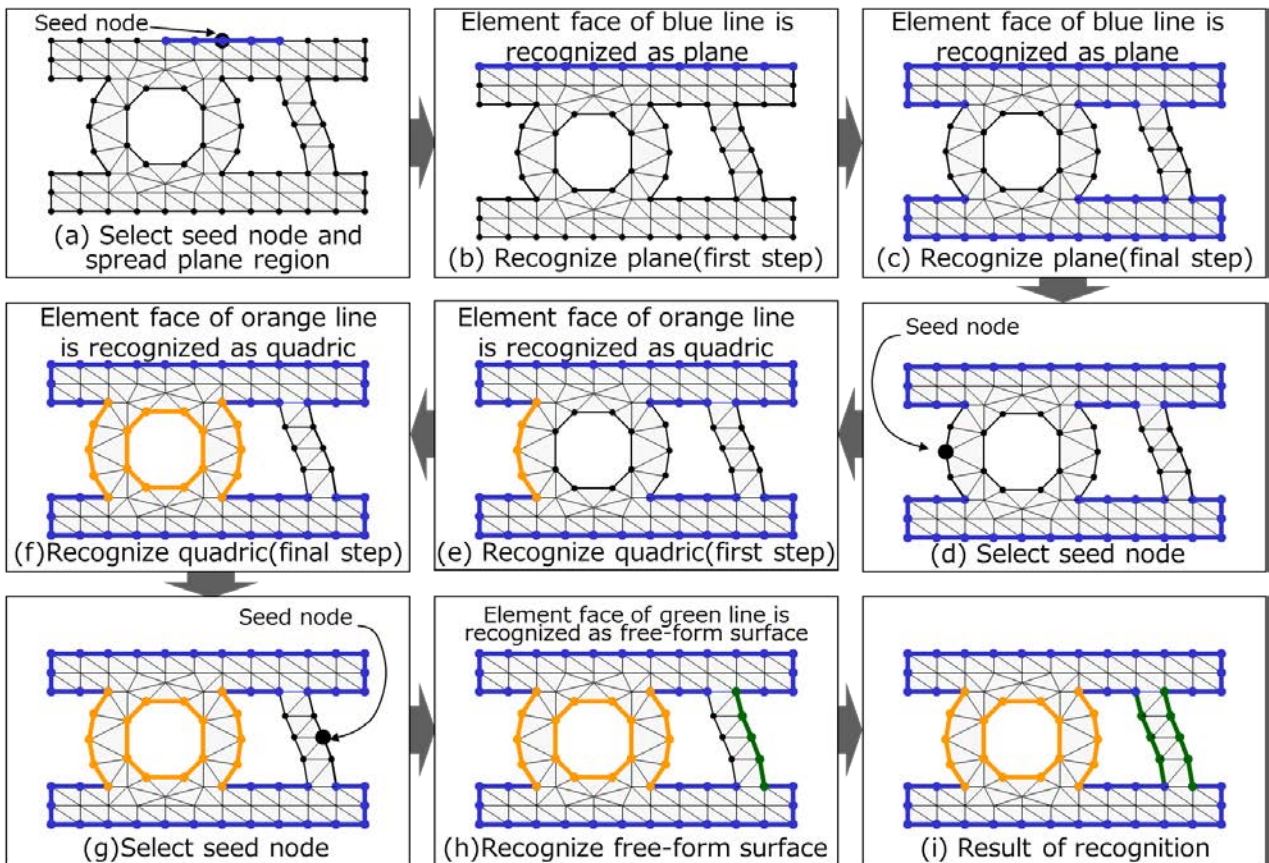


Fig. 6-6 Geometric feature identification process.

二次曲面は対称行列 A 、列ベクトル \vec{b} 、スカラー値 c 、3次元空間座標値 \vec{x} によって、式(6-2)の形で表現できる。ここで、行列 A の固有値を $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 (\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3)$ とした時、これら $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ が正、負、0となるに応じて、二次曲面はTable 6-2のように分類される[笠原, 1982]。

$${}^t\vec{x}A\vec{x} + 2{}^t\vec{b}\vec{x} + c = 0 \quad (6-2)$$

Table 6-2 Classification of quadrics.

λ_1	λ_2	λ_3	Type
+	+	+	Ellipsoid
+	+	0	Elliptic cylinder
+	+	-	Elliptic cone

また、楕円面において $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ が同じ値になる場合は球面、楕円柱面において λ_1, λ_2 が同じ値になる場合は円筒面、楕円錐面において λ_1, λ_2 が同じ値になる場合は円錐面となる。これにより、二次曲面を円筒面、円錐面、球面に分類することができる。

次に、円筒面、円錐面、球面の幾何パラメータを求める方法を説明する。

(1) 円筒面

λ_3 に対応する固有ベクトルが軸ベクトルとなる。この軸ベクトルを法線ベクトルとして円筒面上の任意の1点を通る平面を計算し、この平面上に円筒面上の任意の3点を投影し、この投影3点から円弧を計算する。この円弧の中心点が軸上の点となり、円弧の半径が円筒面の半径となる。

(2) 円錐面

$A\vec{x} + \vec{b} = \vec{o}$ となる座標値 \vec{x} が頂点となる。この頂点から円錐面上の任意の3点への3つのベクトルにおいて、それぞれ距離=1の位置に点を作成し、この3点から円弧を計算する。この円弧の中心点が軸上の点となるので、頂点から軸上の点へのベクトルが軸ベクトルとなり、軸ベクトル、頂点、円錐面上の任意の1点から頂角を計算できる。

(3) 球面

$A\vec{x} + \vec{b} = \vec{o}$ となる座標値 \vec{x} が中心点となる。この中心点から任意の1点への距離が半径となる。

6.4 パラメトリックメッシュモーフィング

6.4.1 パラメトリックメッシュモーフィングの対象範囲

幾何特徴と拘束条件に基づいてメッシュを変形する処理は、寸法変更後の幾何特徴パラメータ計算処理と幾何特徴への節点フィッティング処理から構成される。

前者を 6.4.2 項、後者を 6.4.3 項にて説明する。

尚、本開発では、設定できる寸法拘束として一般的に使われることの多い以下の6種類を実装した。

- (1) 平面と平面の距離
- (2) 平面と円筒面の軸の距離
- (3) 平面と円錐面の軸の距離
- (4) 平面と球面中心の距離
- (5) 円筒面の径
- (6) 球面の径

上記(1)~(4)の距離寸法拘束は、両側の面を対称に移動する、もしくは片側の面を固定拘束するように設定できる。

6.4.2 寸法変更後の幾何特徴パラメータ計算処理

設定された寸法拘束を満足するように、幾何特徴のパラメータを計算する方法を Fig. 6-7 のフローチャートに示す。Fig. 6-7 の手順を Fig. 6-8 を例として説明する。Fig. 6-8 (a)は幾何特徴と寸法拘束を示したものであり、ここでは平面 F1 と平面 F5 の距離 D1=24mm を 30mm に両側の面を対称に移動するとした場合を説明する。まず、距離寸法拘束 D1 が設定されている幾何特徴 F1,F5 の中央

に参照平面を作成し(Fig. 6-7 [Step 1]), この参照平面を固定拘束する(Fig. 6-7 [Step 2]). さらに, この参照平面から F1, F5 それぞれに 15mm の距離寸法拘束(D3, D4)を設定する(Fig. 6-7 [Step 3]). この結果が Fig. 6-8 (b)である. 次に, 距離寸法拘束 D3, D4 が設定されている幾何特徴 F1, F5 を変形候補形状とする(Fig. 6-7 [Step 4]). 変形候補形状 F5 は幾何特徴 F4 と接線連続で接続しているので, 接線連続の幾何拘束を追加し, F4 を変形候補形状に追加する(Fig. 6-7 [Step 5]). 次に変形候補形状 F1, F4, F5 の幾何パラメータを計算し, 変形する(Fig. 6-7 [Step 6]). この場合は, 幾何特徴 F1, F5 の平面のパラメータである平面上の点の変更され, また幾何特徴 F4 の円筒面のパラメータである軸上の点の変更され, Fig. 6-8 (c)に示す形状になる(図中の点線は変形前の形状を示している). また, 変形候補形状 F1, F4, F5 に対して一時的に固定拘束を設定する[Step 7]. この変形の結果, 距離寸法拘束 D2 が設定されている幾何特徴の幾何パラメータと一致しなくなるので幾何特徴 F7 を変形候補形状とする. 変形候補形状 F7 に対しても同様に幾何パラメータを計算し, 変形する. この結果, Fig. 6-8 (d)が得られる.

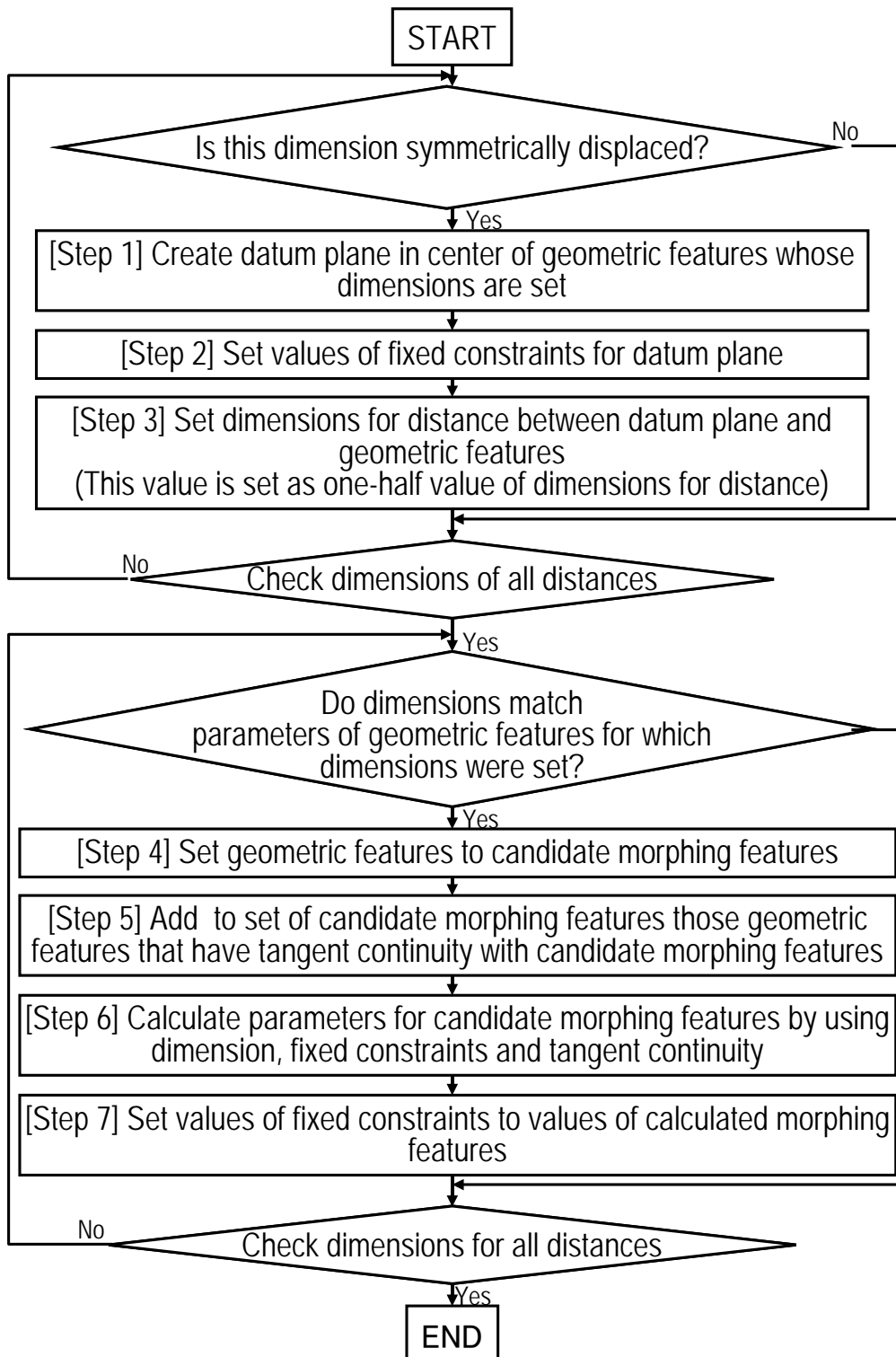


Fig. 6-7 Flowchart of geometric feature calculation process.

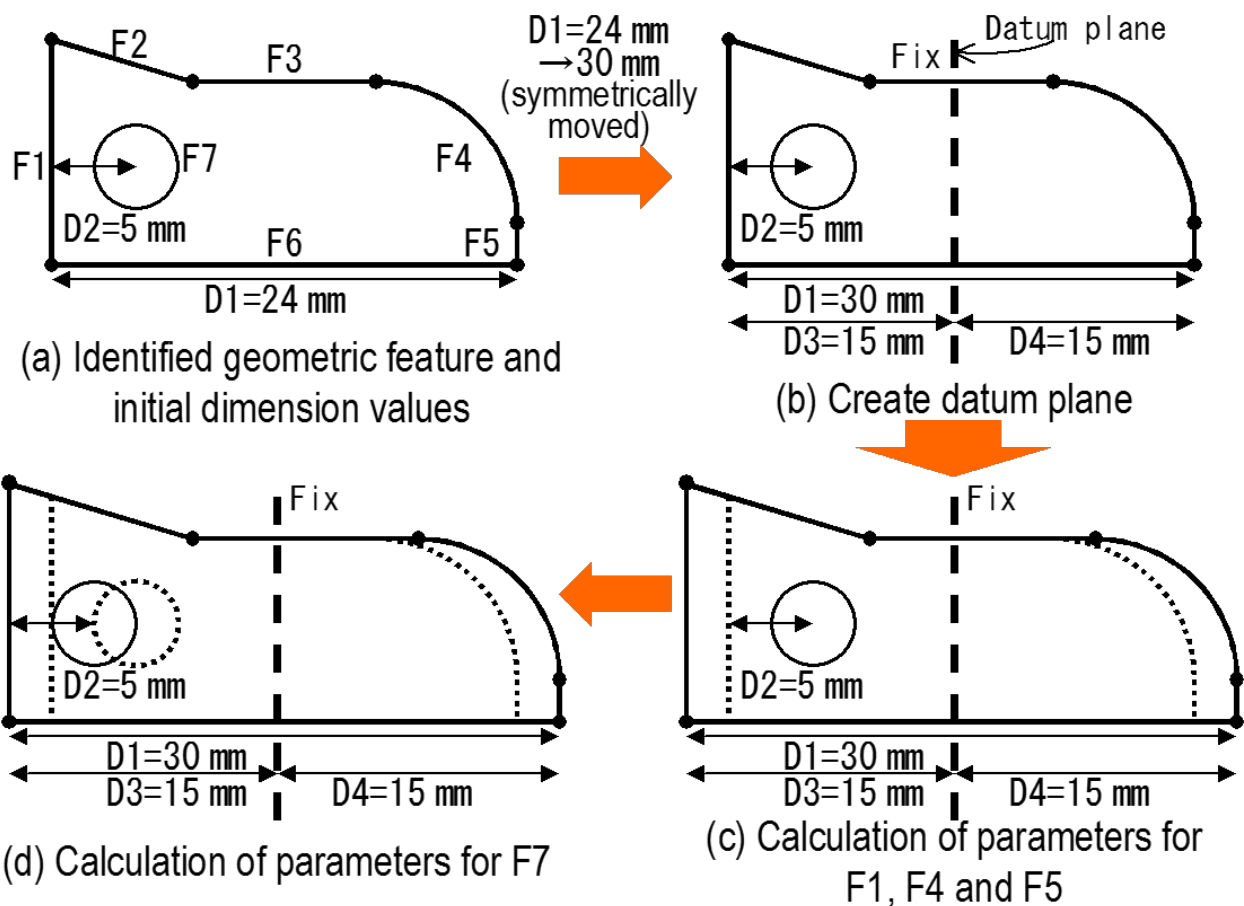


Fig. 6-8 Parametric morphing process applied to geometric-features.

6.4.3 幾何特徴への節点フィッティング処理

変形後の幾何特徴に合致するように、メッシュの各節点を移動することで、メッシュを変形させる。メッシュの表面上の節点は帰属する幾何特徴の情報を持っている。この情報を利用して、各節点を移動後の幾何特徴上に再配置することで、メッシュを変形させる。以下、その方法を説明する。

- (1) 変形前メッシュの表面上の節点と、この節点が帰属する移動後の幾何特徴の距離を求める。また、帰属する幾何特徴が複数ある場合は全ての帰属する幾何特徴との距離を求める。
- (2) 前処理で求めた距離がゼロでない節点を移動対象節点とし、対象節点が帰属する全ての幾何特徴上に配置されるまで、繰返し投影する。
- (3) 幾何特徴上の節点に対して、幾何特徴内でラプラシアンスムージング(Ji et al., 2005) (Vollmer et al., 1999)を行い、節点を移動する。
- (4) 表面上以外の節点(内部節点)はラプラシアンスムージングにより移動する。

Fig. 6-9 に処理の 1 例を示す。Fig. 6-9 は Fig. 6-8 で示した寸法変更に対する節点フィッティングの例である。Fig. 6-9 (a)は変形前のメッシュと変形後の幾何特徴を点線で示した図である。ここで節点Aは幾何特徴 F1 と F2 に帰属する。そこで、Fig. 6-9 (b)に示すように節点Aを幾何特徴 F1 に投影し、さらにこの投影点を幾何特徴 F2 に投影する。この処理を幾何特徴 F1,F2 の両方に配置され

るまで繰り返す。最終的に節点Aは幾何特徴 F1,F2 上にある節点A' の位置に移動する。この処理を全ての節点に対して実行し、スムージングを実行した結果を Fig. 6-9 (c)に示す。

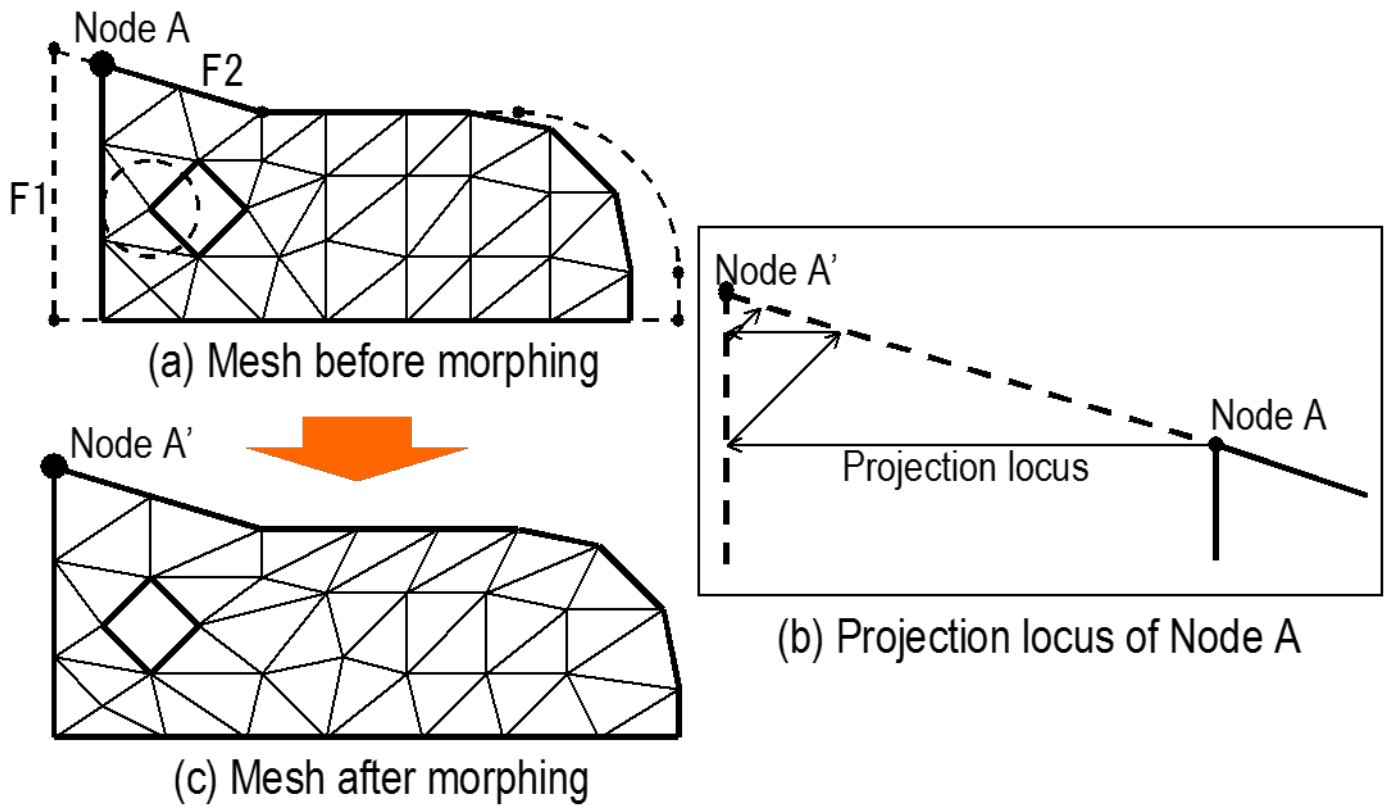


Fig. 6-9 Parametric mesh-morphing process.

6.4.4 パラメトリックメッシュモーフィングの検証

Fig. 6-10(a)のブラケット部品に対して、幾何特徴を認識した結果が Fig. 6-10 (b)である。平面部分、フィレットのかかっている円筒面部分などが正確に認識できている。この幾何特徴に対して、図9 (a)の距離寸法拘束を設定し、10mmを20mmに変形させた結果が Fig. 6-10 (c)である。特に拡大図部分に示したように平面を保持した変形ができており、幾何特徴を保持した変形が可能であることが本技術の特長である。従来技術の Freeform morphing や Control based approach では、この平面部が保持されず、Fig. 6-10 (d)のように折れ曲がってしまう。

尚、幾何特徴の認識処理は 35 秒、メッシュの変形処理は 4 秒であった(Pentium4™ 3.2GHz 1.0GBMemory)。その他のメッシュデータ読込時間、寸法拘束設定等の対話操作時間を合せても、合計1分程度でこのブラケット部品の距離寸法変更を実行できることを確認した。

続いてコネクティングロッド部品への適用結果を示す。Fig. 6-11(a)は変形前の解析メッシュであり、3箇所に対して寸法拘束を設定したものである。これに対して、寸法拘束をそれぞれ44mm→60mm、R5mm→R10mm、φ30mm→φ20mmに変更した結果が Fig. 6-11 (b)である。R5mmからR10mmに変更した部分はフィレットであり、隣接している平面と接線連続の関係になっている

が、これも保持できている事が確認できる。従来技術では、接線連続の関係を保持した変形を行うことは非常に困難である。尚、メッシュ変形の処理時間は約 30 秒である。

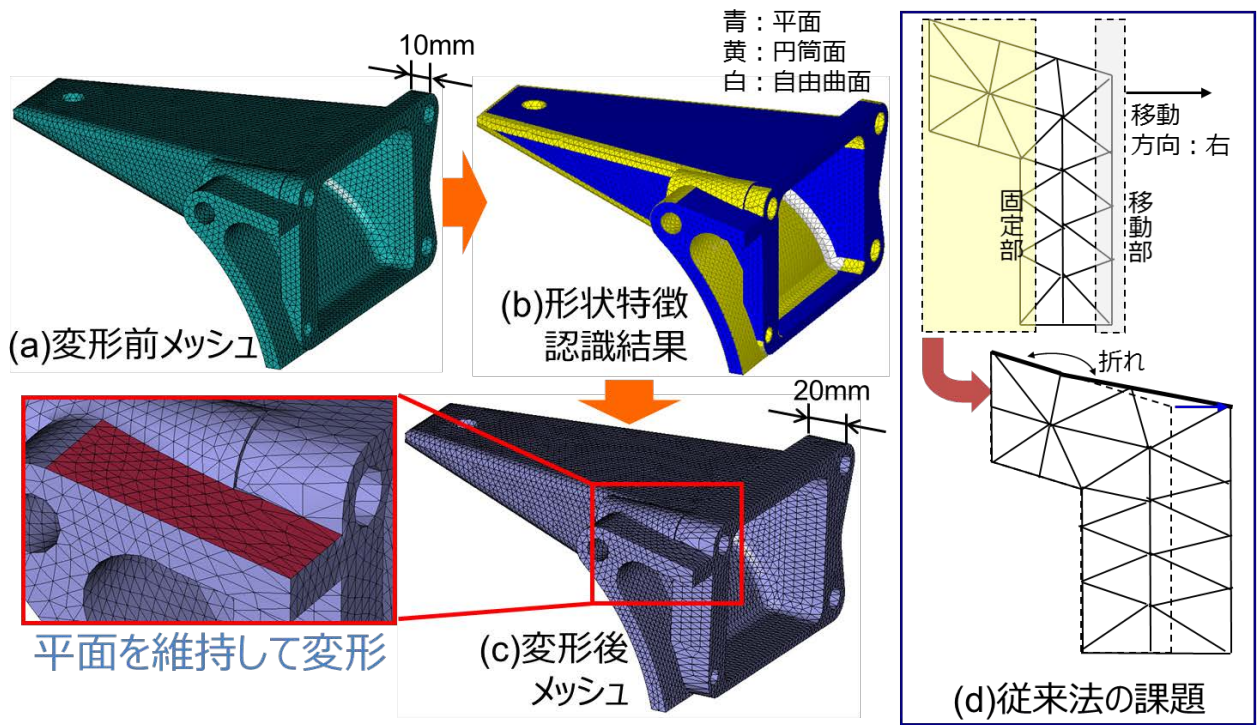


Fig. 6-10 Application result for bracket part.

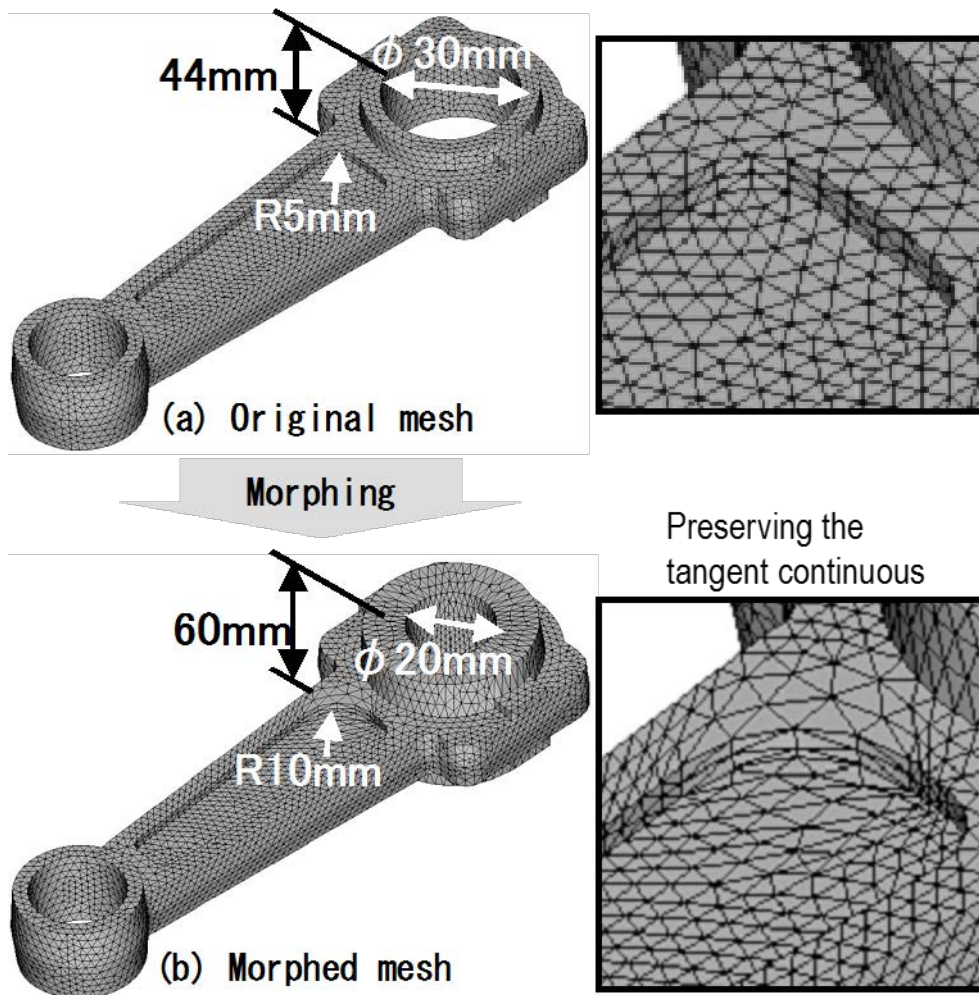


Fig. 6-11 Application result for bracket part for connecting-rod part.

6.5 フィーチャ追加削除モーフィング

6.5.1 フィーチャ追加削除モーフィングの対象範囲

フィーチャ追加削除モーフィング技術の構成図を Fig. 6-12, 処理過程図を Fig. 6-13, Fig. 6-14 を用いて説明する.

- (1) 外形形状定義部(Fig. 6-12 (1), Fig. 6-13 (1), Fig. 6-14 (1)) : フィーチャの追加の場合は, 指定された外形形状の種類およびパラメータに基づいてフィーチャの外形形状を定義する. フィーチャの削除の場合には, 削除するフィーチャの外形要素面群を選択する.
- (2) フィーチャメッシュ作成部(Fig. 6-12 (2), Fig. 6-13 (2), Fig. 6-14 (2)) : フィーチャの追加の場合は, 定義された外形に対して4面体メッシュを作成する. フィーチャの削除の場合には, 選択された外形要素面の境界の要素エッジ群を境界として3角形メッシュを作成し, この3角形メッシュと対象外形要素面を境界として, この境界に対して4面体メッシュを作成する.
- (3) メッシュ集合演算部(Fig. 6-12 (3), Fig. 6-13 (3), Fig. 6-14 (3)) : 本体のメッシュとフィーチャメッシュを和または差演算したメッシュを作成する. この際, リブやボスなどの穴以外のフィーチャを追加する場合は和演算, 削除する場合は差演算をし, また穴フィーチャを追加す

る場合は差演算，削除する場合は和演算をする。

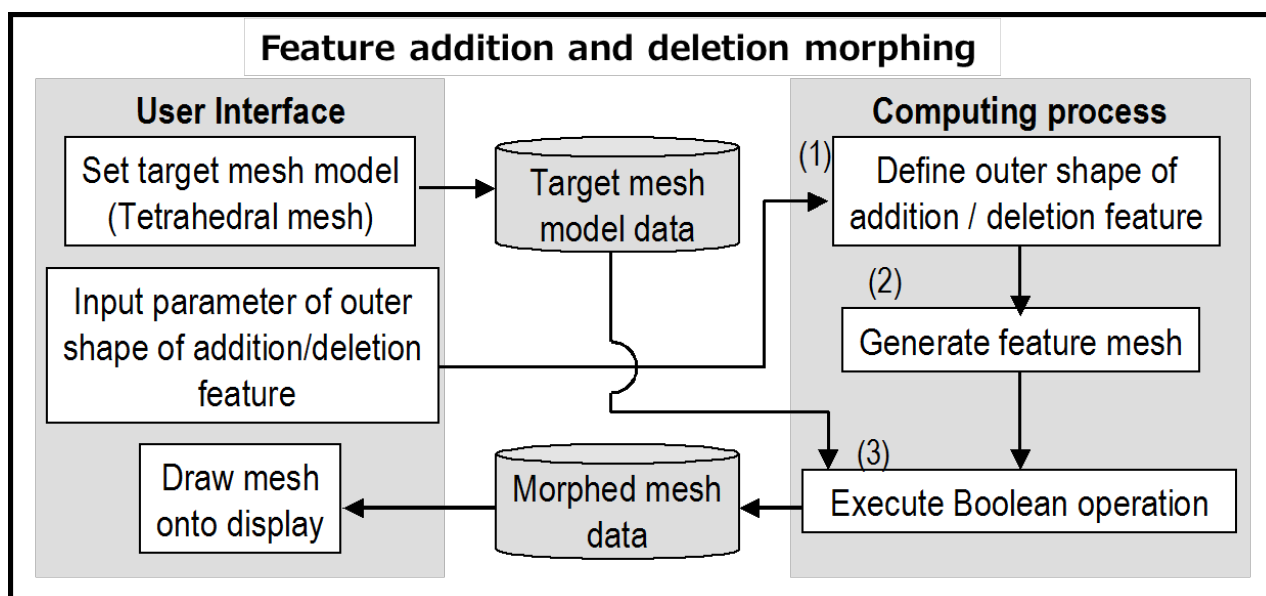


Fig. 6-12 Configuration of morphing technique for adding and deleting features.

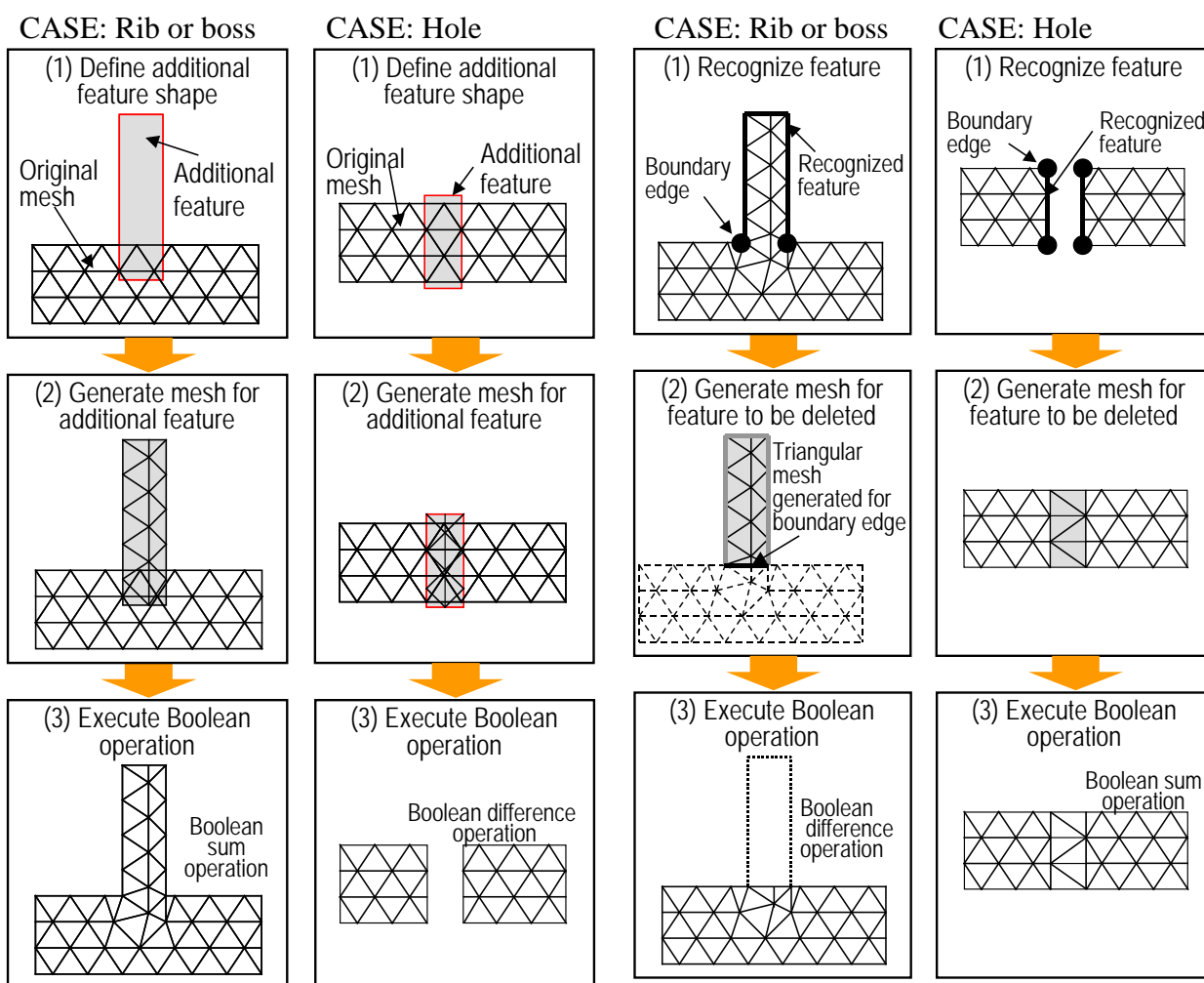


Fig. 6-13 Feature addition morphing process.

Fig. 6-14 Feature deletion morphing process.

6.5.2 フィーチャ追加時の外形形状定義技術

フィーチャの外形定義方法として、下記の2種類を開発した。

(1) 追加するフィーチャのメッシュをインポートし、所望の位置に配置する方式

(2) リブ、ボス、穴の3種類のフィーチャに対して、寸法と位置を定義する方式

(1)に関しては任意のメッシュ生成システムで作成したメッシュを取込む方式であり、任意の形状を追加できる。また、(2)はリブ、ボス、穴の基本形状に限定されるが、他のシステムを介さなくて良いので、操作が簡単である。Fig. 6-15 にリブ、ボス、穴のそれぞれについて指定するパラメータを記す。尚、Fig. 6-15 においては、本体の形状を薄いグレー、追加外形形状を濃いグレーで示している。

(1) リブ(上端指示型): Fig. 6-15 (1)

リブの始点と終点の座標値、リブ平面上の任意の1点の座標値、厚さ

(2) リブ(根元ガイドライン指定型): Fig. 6-15 (2)

根元の点列(2点以上)座標値、高さ、厚さ

(3) ボス: Fig. 6-15 (3)

中心点の座標値、外径の直径、内径の直径、中心軸、高さ

(4) 穴: Fig. 6-15 (4)

中心点の座標値、穴の直径、中心軸、深さ

尚、Fig. 6-15 (1)~(4)においては説明を簡単にするために本体部の形状は平面で示したので、本体形状と追加外形形状の境界は平面になっているが、曲面(実際は四面体要素であるので平面の集合)や段差がある個所にも定義できる。その1例が Fig. 6-15 (5)である。段差やフィレット(角R)のある個所にリブ(上端指示型)を配置した例であり、この場合、本体形状とリブ形状は交差する(Fig. 6-15 (5)左側)。最終的には、6.5.3 項に記載のメッシュ集合演算技術により本体形状とリブ形状は接続され(Fig. 6-15 (5)右側)、本体形状とリブ形状の境界は平面以外となる。

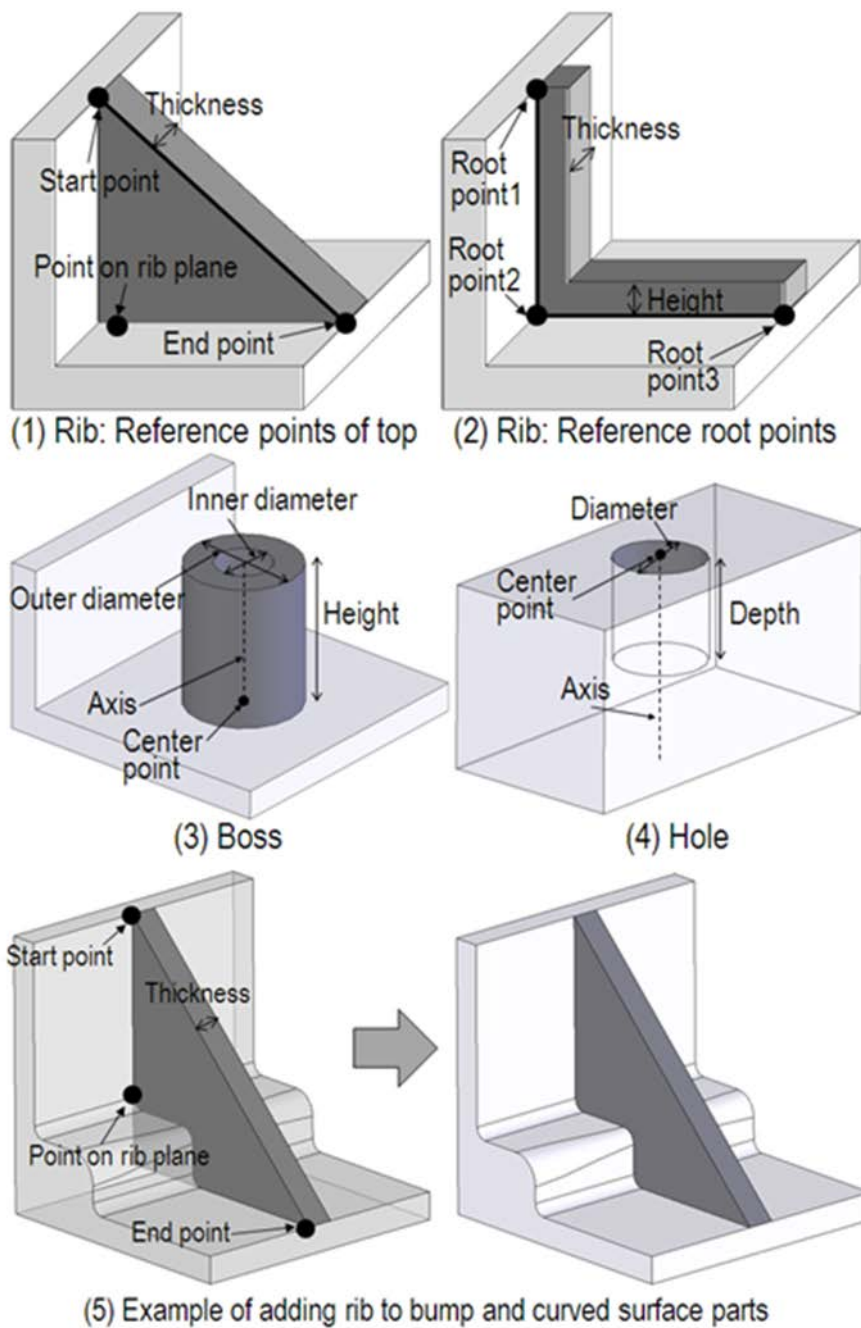


Fig. 6-15 Additional feature parameters.

6.5.3 メッシュ集合演算

本体のメッシュとフィーチャのメッシュの集合演算する方法を説明する。

メッシュ集合演算を実現する方法として下記の2つの方法が考えられる。

- (1) すべての交差する四面体要素同士を結合し、さらに結合した形状は四面体ではなくなるので、結合形状を四面体要素に分割する。
- (2) 交差する四面体要素群の境界要素面(三角形)を結合し、結合した境界要素面を境界として四面体メッシュを生成する。

この2つの方法において、方法(1)は四面体要素の交差状態によっては非常に品質の悪い要素が作

成され、またこの低品質要素を完全に除去することは困難である。これに対し、方法(2)は境界要素面の三角形に低品質な要素が作成されるが、これはエッジコラプス(Fig. 6-16(a))やエッジスワップ(Fig. 6-16 (b))にて比較的単純に低品質要素を除去することができ、また高品質な境界要素面に対しては高品質な四面体メッシュを作成できる。すなわち、四面体要素同士を結合するのではなく、交差要素を削除し、削除した空間に対してローカルにメッシュを作成することで、要素の品質を確保するということである。本研究では高品質な要素を作成できる方法(2)を採用することとした。

以下に和演算、差演算それぞれの基本処理手順を Fig. 6-17 を用いて説明する。

(1) 和演算の処理方法

- (1) フィーチャに対して作成したメッシュ(フィーチャメッシュ)と本体のメッシュの交差要素を検索する(Fig. 6-17 (b)).
- (2) 交差要素群における境界要素面を抽出する(Fig. 6-17 (c)).
- (3) フィーチャメッシュと本体メッシュの境界要素面を交差箇所では結合する。また、外殻の内側にある境界要素面は削除する(Fig. 6-17 (d)).
- (4) 結合した境界要素面をエッジコラプス、エッジスワップにより高品質化する(Fig. 6-17 (e)).
尚、本研究では境界要素面の品質改善のしきい値はストレッチ 0.2 以上とした。
- (5) 境界要素面で構成される境界に対して逐次法で四面体メッシュを作成する(Fig. 6-17 (f)).
- (6) 作成した四面体メッシュとフィーチャメッシュと本体メッシュをマージする(Fig. 6-17 (g)).

(2) 差演算の処理方法

差演算の場合はフィーチャ部のメッシュを削除した後に境界部の節点をフィーチャの境界に移動する方法やフィーチャの境界の隙間に新たに要素を追加する方法が考えられるが、この方法では要素品質が大きく低下してしまうので現実的ではない。そこで和演算と同じ処理で高品質メッシュを作成した後に、元はフィーチャメッシュであった要素を削除することで要素品質を確保することとした。

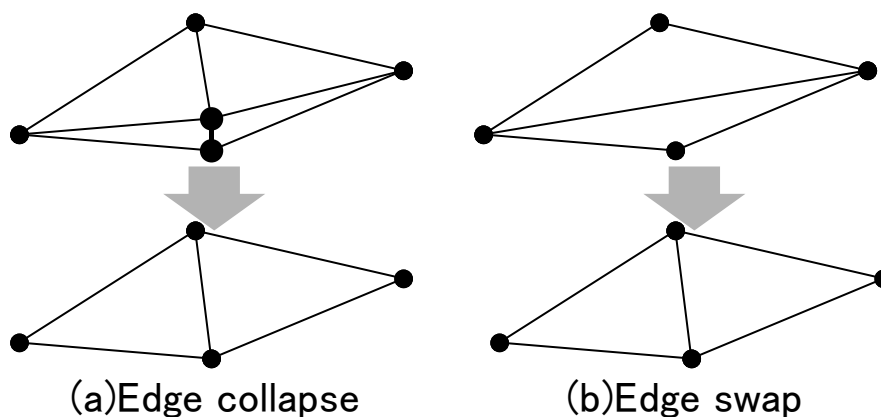


Fig. 6-16 Quality improvement of triangle mesh.

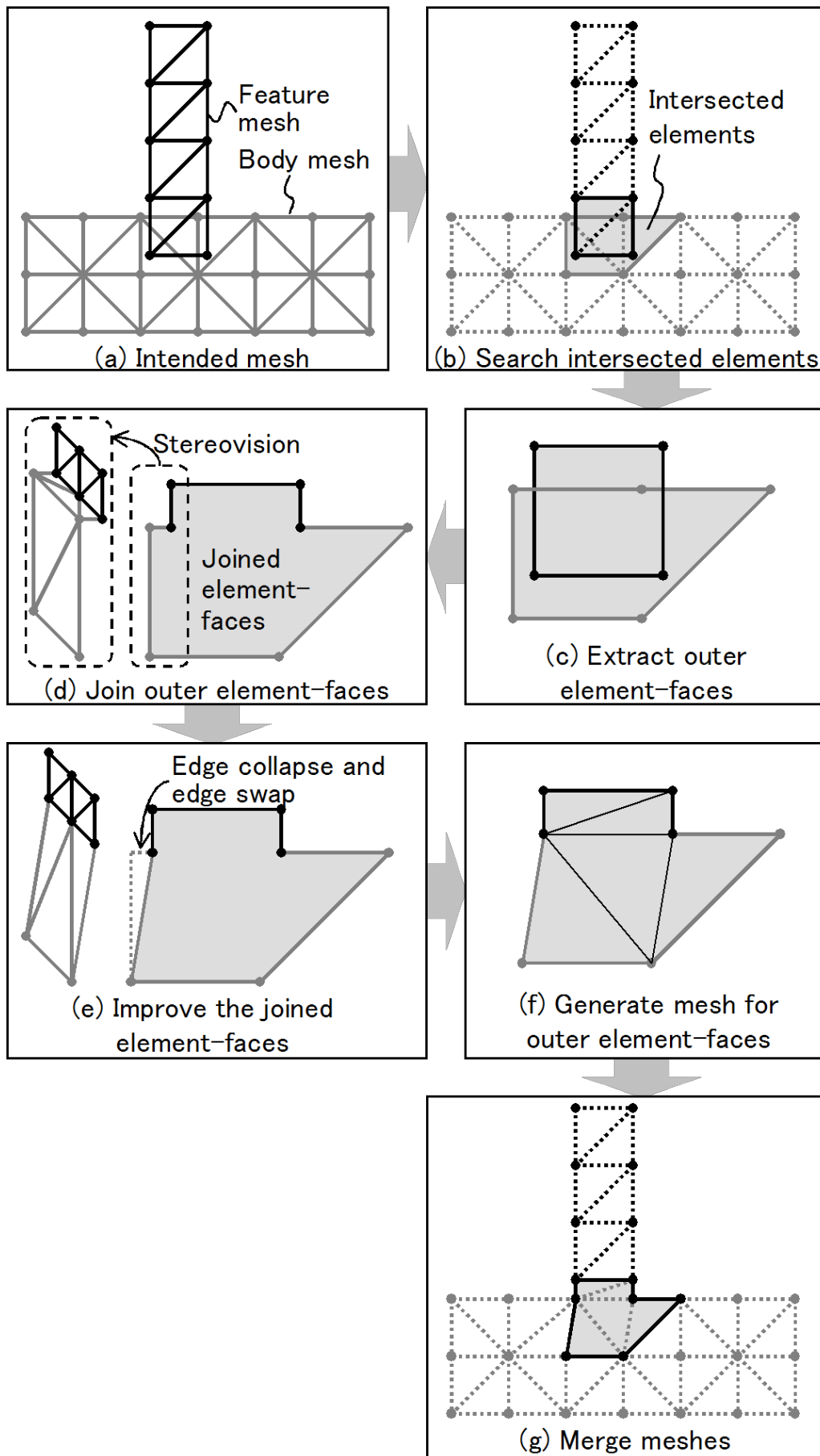


Fig. 6-17 Procedure of mesh set operation.

6.5.4 フィーチャ追加削除技術の検証

エンジnbロック部品の解析メッシュに対してリブを追加した例を Fig. 6-18 に示す。Fig. 6-18(a) は変形前の解析メッシュであり、86577 要素、148022 節点である。この解析メッシュに対して、Fig. 6-18(a)の拡大図の箇所にもリブを追加した結果が Fig. 6-18 (b)である。本例はリブ(上端指示型)として、Fig. 6-18 (a)の拡大図に示したリブの始点と終点、リブ平面上の1点を指定し、厚さとして5mmを指定した例である。このようにリブの断面が折れ線になるような形でも適用できるので、任意の位置にリブを追加できる。

尚、変形時間は46秒であり、要素品質に関しても最低の要素ストレッチは0.11であり、目標を実現していることを確認した(Pentium4 3.2GHz 1.0GBMemory)。

続いて、Fig. 6-19(a)のエンジnbロック部品に対して、リブを削除した結果がFig. 6-18 (b)である。本エンジnbロック部品は約13万節点のメッシュである。リブ削除時間は25秒であり、要素品質に関しても最低の要素ストレッチは0.1であり、目標を実現していることを確認した。

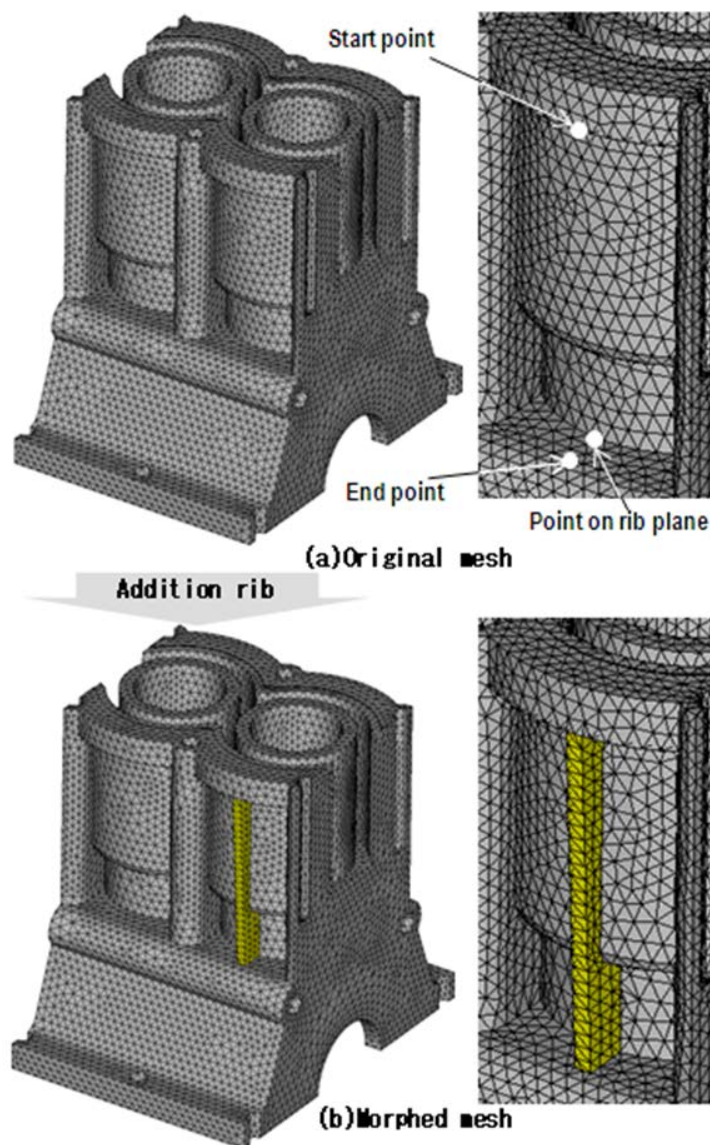
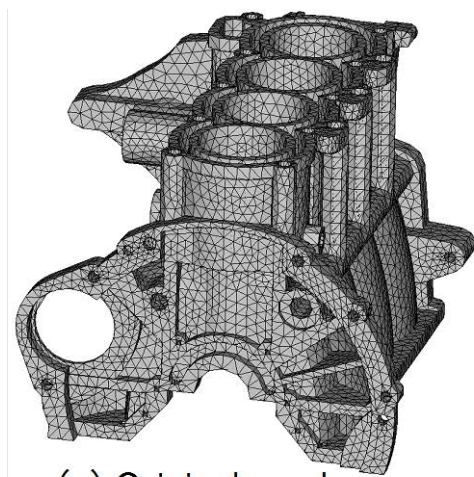
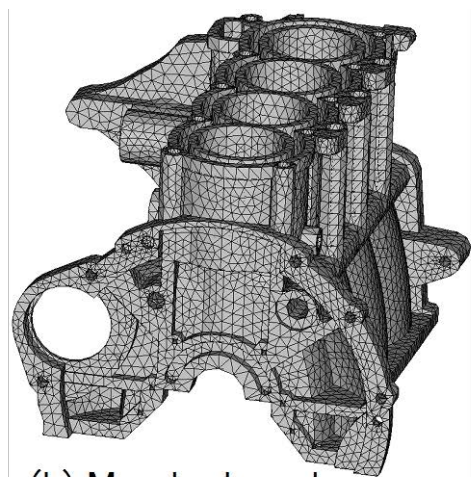


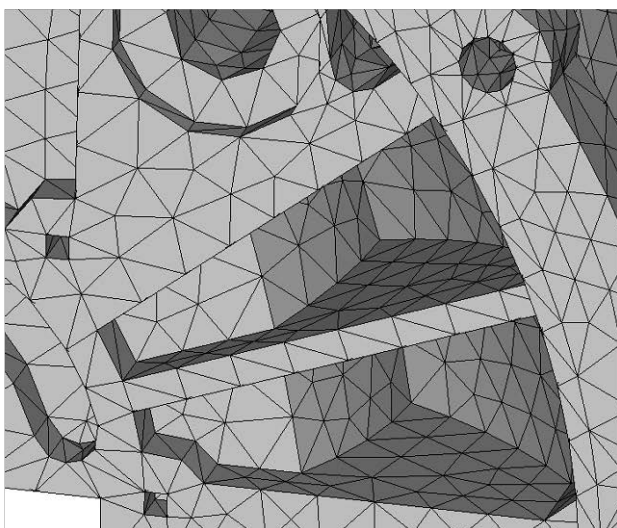
Fig. 6-18 Example of adding ribs to the engine block partial model.



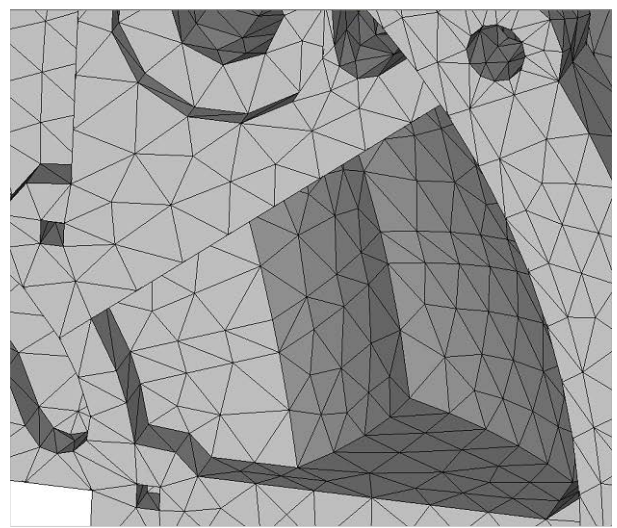
(a) Original mesh



(b) Morphed mesh



(c) Extended figure of original mesh



(d) Extended figure of morphed mesh

Fig. 6-19 Example of deleting ribs to the engine block partial model.

6.6 フィッティングモーフィング

6.6.1 フィッティングモーフィングの対象範囲

本技術は指定された変形後形状にメッシュをフィッティングさせるものである。変形後形状のデータとしては、三次元形状を表現する最も一般的な形式である STL(Stereolithography)に対応することとした。

本技術を用いたメッシュフィッティング手順の概要を以下に示す。

- (1) 利用者は、変形前のメッシュデータと、変形後形状(STL)を準備する。
- (2) 利用者は、変形前メッシュデータに対して、フィッティングさせる箇所の節点(フィッティング節点)、フィッティングに追従して移動する節点(可動節点)を指定する。なお、指定されなかった節点は移動しない節点(固定節点)となる。
- (3) 上記(2)で指定したフィッティング節点に対して幾何特徴認識を行う。以降、この幾何特徴を

オリジナル幾何特徴と称する。

- (4) 変形後形状に対して幾何特徴認識を行う。以降、この幾何特徴をターゲット幾何特徴と称する。
- (5) オリジナル幾何特徴とターゲット幾何特徴の対応付けを行う。
- (6) 幾何特徴の対応関係に基づいて、フィッティング節点を変形後形状に投影する。
- (7) 可動節点を周辺のフィッティング節点の移動量に基づいて相対的に移動する。

高精度な対応付けを行うために、フィッティング節点と変形後形状の幾何特徴を認識し、この幾何特徴間で対応付けを行っている。幾何特徴間で対応付けを行うことにより、形状の境界部(平面と円筒面の境目など)を考慮した高精度な対応付けが可能となる。

以下、(5)を実現する形状特徴対応付け技術、(6)を実現する節点フィッティング技術、(7)可動節点移動技術について説明する。

6.6.2 形状特徴対応付け技術

オリジナル形状特徴上の節点(フィッティング節点)に対して、投影先のターゲット形状特徴を決定する処理過程を説明する。オリジナル形状特徴とターゲット形状特徴において形状特徴の数が異なる場合、数が多いほうの形状特徴に対して、隣接する形状特徴をマージすることで、同数になるように処理している。以下、Fig. 6-20 を用いて説明する。なお、本例では説明を簡単にするために二次元の図を用いて説明する。

[Step1] : オリジナル形状特徴とターゲット形状特徴を認識する。Fig. 6-20 (a)は結果のオリジナル形状特徴(実線)とターゲット形状特徴(破線)を示している。

[Step2] : 式(6-3)により、各形状特徴間の適合度を計算する。なお、適合度が負になった場合は、無限大とする。その結果が Fig. 6-20 (a)の適合度である。

ここで、オリジナル形状特徴とターゲット形状特徴において形状特徴の数が異なる場合、[Step3]~[Step6]の処理を数が同じになるまで繰り返す。

[Step3] : ターゲット形状特徴の数がオリジナル形状特徴の数より多い場合は、ターゲット形状特徴との適合度の最小値が最大となっているオリジナル形状特徴を探す。この例では形状特徴 F_c が該当する。オリジナル形状特徴の数がターゲット形状特徴の数より多い場合は、オリジナル形状特徴の各形状特徴との適合度の最小値が最大となっているターゲット形状特徴を探す。

[Step4] : [Step3]で見つかった形状特徴に対して、隣接する形状特徴との法線方向角度が最も小さい形状特徴を探す。

[Step5] : 上記[Step4]で見つかった2つの形状特徴をマージする。この例では形状特徴 F_c が F_d にマージされ、 F_d' となる。これでオリジナル形状特徴とターゲット形状特徴の形状特徴の数は同じになる。

[Step6]: 適合度を再計算する.

[Step7]: 適合度が最小となっている組を対応付ける. この例では, Fig. 6-20 (b)に示すように, Fa と Ba, Fb と Bb, Fd' と Bc が対応付く.

$$R_{a,b} = \frac{\sum_{i=1}^N D_i / \cos(\theta_i)}{N} \quad (6-3)$$

$R_{a,b}$: オリジナル形状特徴 a とターゲット形状特徴 b の適合度

N : オリジナル形状特徴 a に属する要素面数

D_i : オリジナル形状特徴 a の要素面 i とターゲット形状特徴 b の要素面の最小距離

θ_i : D_i 算出の際に距離が最小となった要素面の組の法線ベクトル間の角度

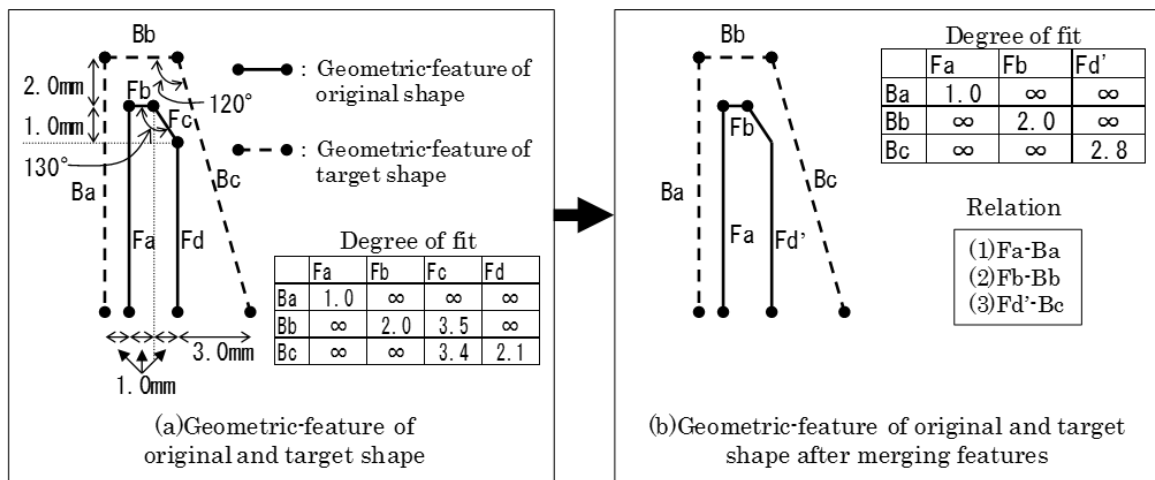


Fig. 6-20 Shape feature association procedure.

6.6.3 節点フィッティング技術

フィッティング節点を変形後形状に投影する処理について処理過程を Fig. 6-21 を用いて説明する.

まず始めに, フィッティング節点において帰属するオリジナル形状特徴が複数ある場合(形状特徴の境界に位置する節点)は, この節点を対応付けているターゲット形状特徴の境界となっている境界エッジ上に投影し, 移動する. この例の場合, Fig. 6-21 (a)の節点 Na は境界エッジ Ea 上に, 節点 Nb は境界エッジ Eb 上に投影される. フィッティング節点において帰属する形状特徴が1つの場合は, この節点を対応付けているターゲット形状特徴を構成する三角形上に投影し, 移動する. この例の場合, Fig. 6-21(b)のように投影される. フィッティング節点を帰属する形状特徴上でラプラシアンスムージングを行う. この結果, Fig. 6-21 (c)のメッシュが完成する.

本処理では要素品質を確保するために, ラプラシアンスムージングを採用しているが, 複雑形状の場合, 要素の歪みや裏返りが発生する可能性がある. この場合, 後述する品質改善技術を用いて修正する.

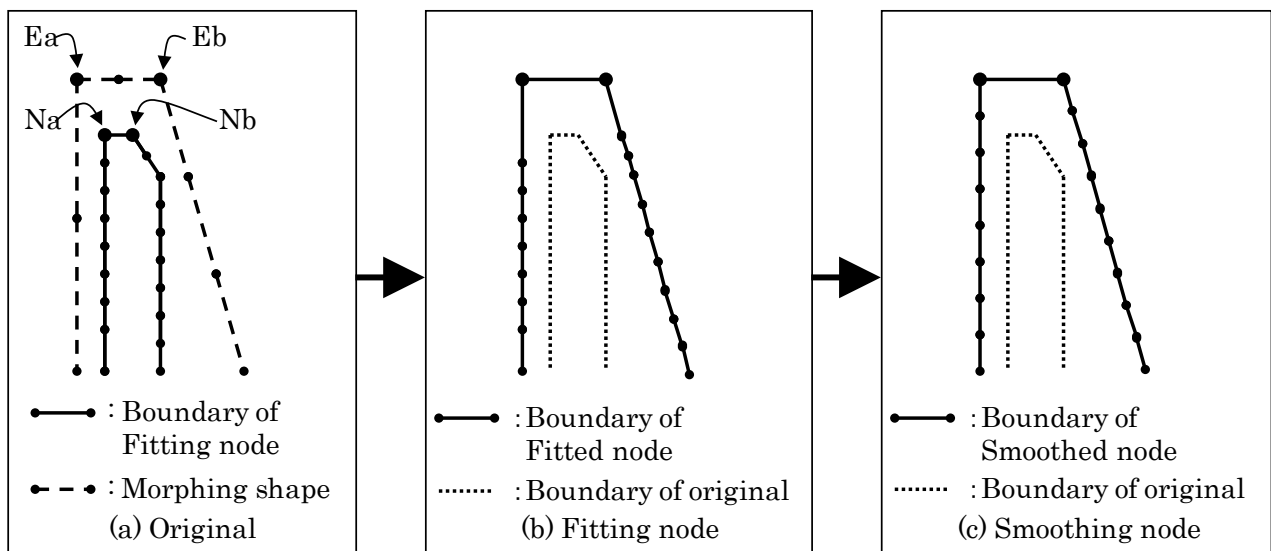


Fig. 6-21 Node fitting procedure.

6.6.4 可動節点移動技術

可動節点の節点座標値は式(6-4)により算出する。係数 c_1 はフィッティング節点側に近いほど大きな値となり、固定節点側に近いほど小さな値となる。また、フィッティング節点側、固定節点側のいずれかもしくは両方に節点を寄せるようなことも考慮する必要がある。これは、可動節点が壁面近傍の層状要素になっている場合、層高さは極力変化させないということを考慮してのことである。そこで本技術では、曲率が連続に変化するという特徴を持つ式(6-5)に示すファーガソン曲線 (Li, et al., 2012) を用いることとした。ファーガソン曲線とは始点と終点の座標値、始点側の速度ベクトル、終点側の速度ベクトルを変数に持つ曲線である。(0, 0)~(1, 1)の二次元空間に対して、固定節点側の接近度(固定節点に寄せる度合い)に応じて始点側の速度ベクトルの向きを、フィッティング節点側の接近度(フィッティング節点に寄せる度合い)に応じて終点側の速度ベクトルの向きを制御したファーガソン曲線を計算する。この曲線の XY 座標を式(6-6)に示した値とすることで、固定節点およびフィッティング節点からの距離と接近度に応じて係数 c_1 を計算する。なお、速度ベクトルは式(6-7)により、接近度に応じて計算する。なお、接近度は-1.0~1.0の範囲とした。この式(6-7)は接近度が 0 の場合は速度ベクトルを(1, 1)とし、大きくなるほど速度ベクトルを X 軸に傾け、小さくなるほど Y 軸に傾けることを示している。

$$\vec{P}' = \vec{P} + c_1 \vec{V} \quad (6-4)$$

- \vec{P}' : 移動後の節点座標値
- \vec{P} : 移動前の節点座標値
- \vec{V} : 最も近いフィッティング節点の移動ベクトル
- c_1 : 係数

$$Fc(t) = [t^3 \quad t^2 \quad t \quad 1] \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_s \\ P_e \\ V_s \\ V_e \end{bmatrix} \quad (6-5)$$

$Fc(t)$:ファーマソン曲線定義関数

t :媒介変数($0 \leq t \leq 1$)

P_s :ファーマソン曲線の始点

P_e :ファーマソン曲線の終点

V_s :始点側の速度ベクトル

V_e :終点側の速度ベクトル

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_a / (d_a + d_b) \\ c_1 \end{pmatrix} \quad (6-6)$$

d_a :対象可動節点と固定節点の距離

d_b :対象可動節点とフィッティング節点の距離

$$V_s = \begin{pmatrix} \cos(-\alpha_a \pi/4) - \sin(-\alpha_a \pi/4) \\ \sin(-\alpha_a \pi/4) + \cos(-\alpha_a \pi/4) \end{pmatrix}, \quad V_e = \begin{pmatrix} \cos(-\alpha_b \pi/4) - \sin(-\alpha_b \pi/4) \\ \sin(-\alpha_b \pi/4) + \cos(-\alpha_b \pi/4) \end{pmatrix} \quad (6-7)$$

α_a :固定節点側の接近度

α_b :フィッティング節点側の接近度

接近度に応じた、固定節点とフィッティング節点への距離と係数 c_1 の関係を Fig. 6-22 に示す。Fig. 6-22 (a) は接近度を 0 にした場合の関係を示すグラフであり、距離に応じて線形に変化することを示している。Fig. 6-22 (b) は接近度を 1 にした場合である。固定節点から、ある程度離れても係数 c_1 は 0 近傍の値となる。すなわち、ほとんど移動しないので、固定節点側に節点が寄る。同様に、フィッティング節点から、ある程度離れても係数 c_1 は 1 近傍の値となるので、フィッティング節点の近傍に位置する節点の移動量は、フィッティング節点の移動量とほぼ同じになり、フィッティング節点側に節点が寄る。Fig. 6-22 (c) は固定節点側の接近度を -1、フィッティング節点側の接近度を 0 にした場合である。固定節点の近傍に位置する節点の係数 c_1 は Fig. 6-22 (a) に示したものと比べ大きくなっている。すなわち、固定節点から離れるように節点が移動する。フィッティング節点に近い位置の係数 c_1 は、Fig. 6-22 (a) に示したものとほぼ同じであるので、距離に応じて線形に変化することを示している。

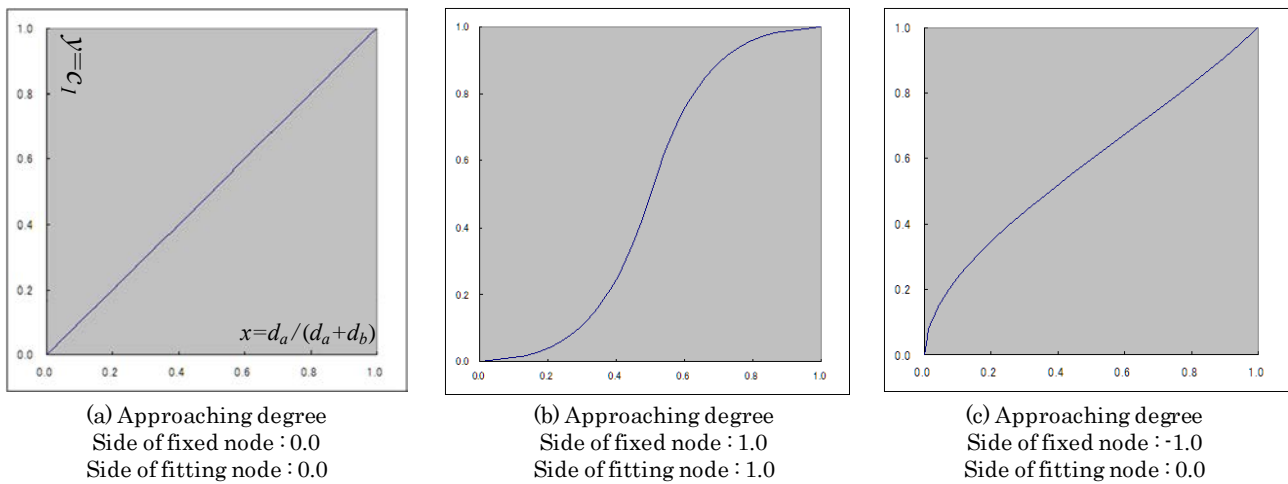


Fig. 6-22 Example of c_1 factor.

6.6.5 フィッティングモーフィング技術の検証

ピストンヘッドモデルへの適用結果を Fig. 6-23 に示す。Fig. 6-23 (a)は元のメッシュデータと変形後形状を示している。本モデルは約 1.5 万個の四面体二次要素で構成されるメッシュデータであり、変形後形状の STL は約 300 個の三角形から構成されるデータである。変形後形状は、ピストンヘッド内面において、正面および背面側の肉厚は変えずに、側面の肉厚を大きくするように作成している。なお、青色の部分は平面、黄色の部分は円筒面、白色の部分は自由曲面として形状特徴認識されたことを示している。フィッティングした結果を Fig. 6-23 (b)に示している。ピストンヘッド内面の円筒面上のすべての節点が、変形後形状上に移動していることを確認した。

従来は、このような変形を行う場合、CAD データを修正した後にメッシュ作成ツールでメッシュを作成する必要があるが、数十分程度かかる作業であった。本技術では、2 秒で変形後形状のメッシュを作成でき、パラメータサーベイ等の解析作業の時間短縮に有効である。なお、使用した計算機は CPU : Intel(R)Xeon(R) E5640, Memory : 32.0GB である。

また、モーフィング前の要素ストレッチ(四面体要素の最長エッジ長と内接球の半径の比を正四面体の場合が 1.0 になるように正規化した数値) の最小値は 0.234 であったのに対して、モーフィング後は 0.208 であった。十分な要素品質を保持しており、このままのデータで FEM 等の解析を実施できる。

ギアモデルへの適用結果を Fig. 6-24 に示す。Fig. 6-24 (a)は元のメッシュデータと変形後形状を示している。本モデルは約 2 万個の四面体二次要素で構成されるメッシュデータであり、変形後形状の STL は約 6000 個の三角形から構成されるデータである。変形後形状は、内側の 3 つ穴の大きさを変えるように作成している。なお、青色の部分は平面、黄色の部分は円筒面、水色の部分は円錐面として形状特徴認識されたことを示している。フィッティングした結果を Fig. 6-24 (b)に示している。穴を構成する円筒面上のすべての節点が、変形後形状上に移動していることを確認した。また、1 つの穴は 4 つの円筒面が接続した形状になっている。この円筒面間の接続境界上の節点(例え

ば、Node A)は、変形後形状の円筒面間の接続境界上に移動している。形状特徴認識技術と対応付け技術により、形状の境界部を保持するようにモーフィングできることを確認した。なお、本適用の計算時間は5秒であり、前節で示した解析作業の時間短縮と同様の効果を期待できる。

また、モーフィング前の要素ストレッチの最小値は0.223であったのに対して、モーフィング後は0.055であった。一般的なFEM計算ソフトはストレッチ0.1以上を推奨しており、このままのデータでは、解析精度の悪化を招く可能性がある。本手法は節点を移動することで、メッシュを変形しているため、狭い空間に対して、要素サイズ以上の変形が行われると、このような要素品質の低下は不可避の事象である。そこで、6.7節で説明する要素品質改善機能を実施した。本要素品質改善機能は部分的に要素細分割を行うことで要素品質を改善する技術である。この結果をFig. 6-24(c)に示す。低品質要素があった部分の要素が高密度化され、この結果、品質改善後の要素ストレッチは0.219と、モーフィング前の要素ストレッチと同等まで改善していることを確認した。

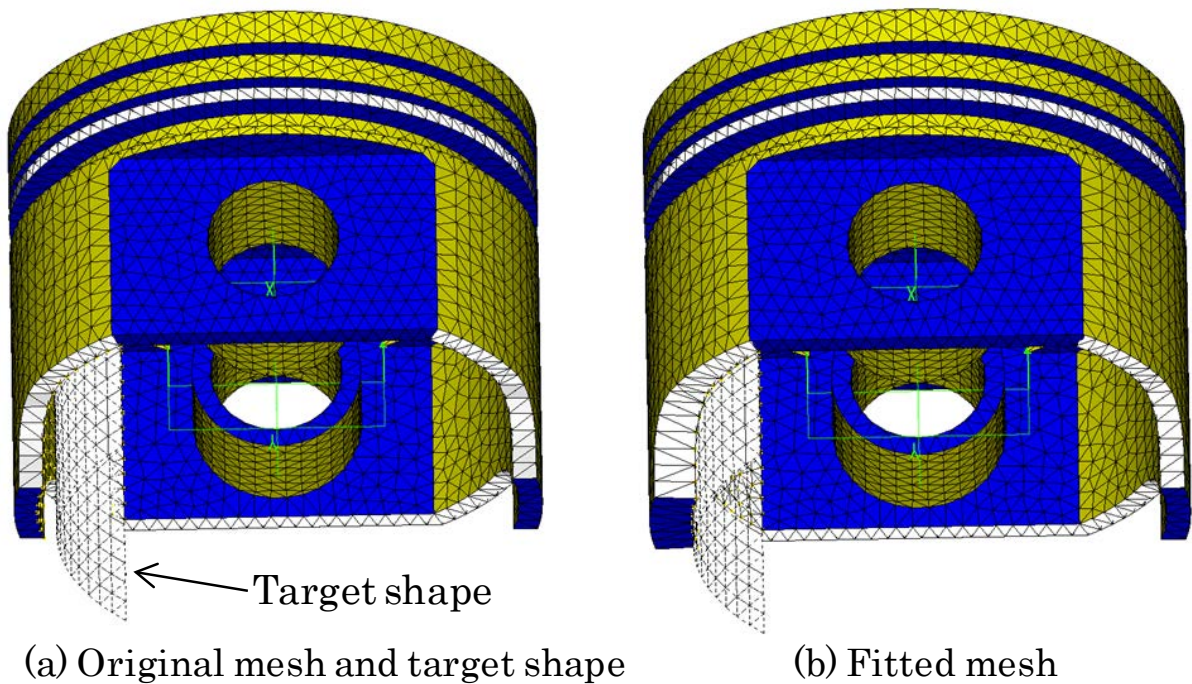


Fig. 6-23 Application for a piston head model.

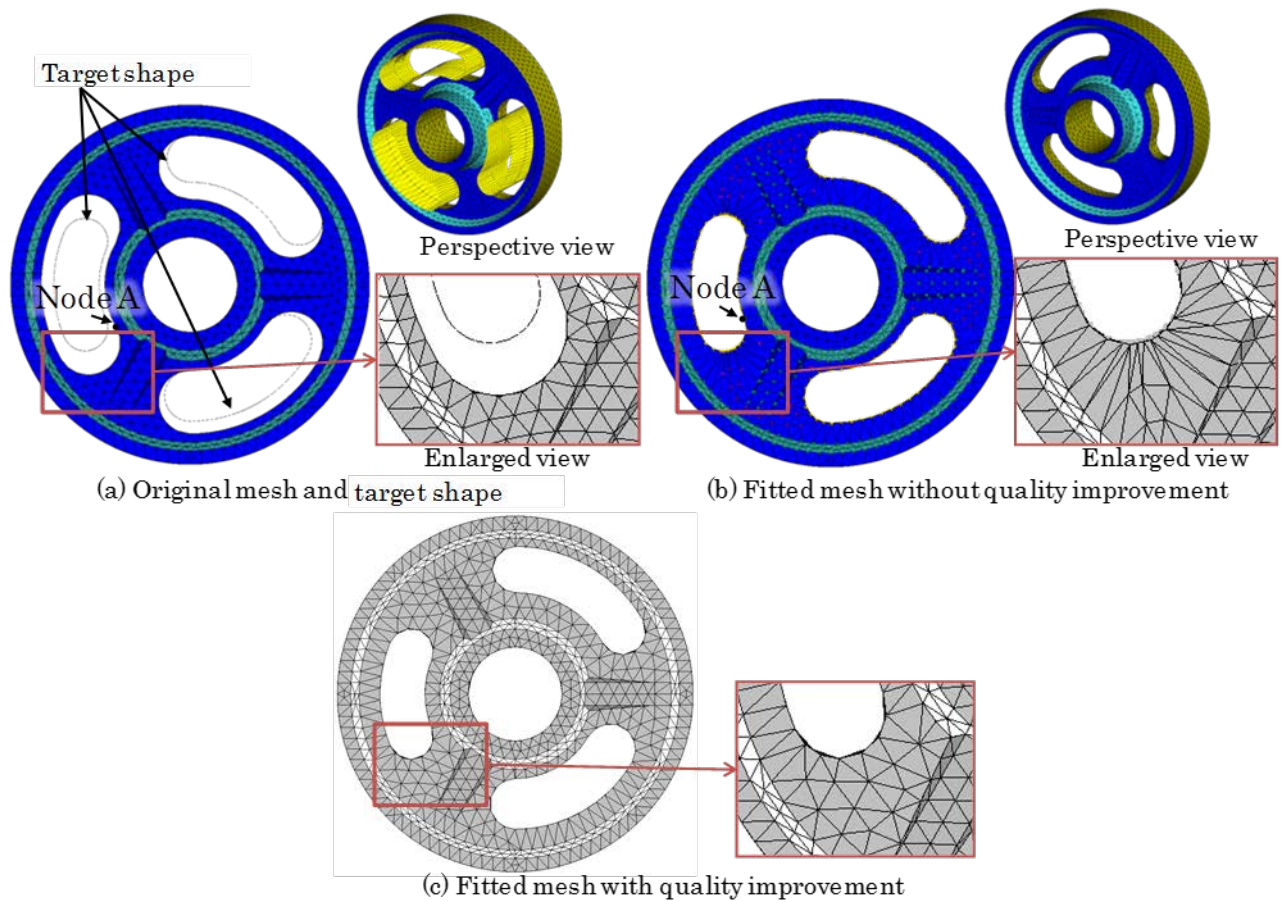


Fig. 6-24 Application for a gear model

6.7 モーフィング後の要素品質改善

6.7.1 従来の要素品質改善技術の課題

メッシュモーフィングは基本的に節点を移動することで変形を実現しているため、要素の大きさと比較して変形量が大きい場合に、要素の伸び縮みが大きくなり要素品質が悪化する。例えば、Fig. 6-25(a)のメッシュに対して、穴の径を 10mm から 8mm に変更しても Fig. 6-25 (b)のように要素歪みはほとんど発生しないが、穴の径を 10mm から 2mm に変更すると Fig. 6-25 (c)のように、大きく伸びた要素が発生する。要素品質の評価指標の 1 つである要素ストレッチ(四面体要素の最長エッジ長と内接球の半径の比を正四面体の場合が 1.0 になるように正規化した数値)で比較すると、それぞれ、0.38, 0.31, 0.005 と大きく悪化している。このままでは、解析計算を実行しても十分な解析精度が得られないため、要素品質を改善する必要がある。

要素品質を改善する手法として最も一般的な手法であるラプラシアンスムージング法(Ji et al., 2005) (Vollmer et al., 1999)は節点を移動するのみであるため、品質が悪化した部位に十分な数の節点がないと要素品質を改善できない場合がある。例えば、Fig. 6-25 (c)のメッシュの場合、穴周辺には節点がないので、品質を改善できない。この場合、品質が悪化した要素を細分割や結合をするなどして、要素の接続関係も変更する必要がある。この方法として、B. M. Klingner らによるデローニ

細分割技術(Klingne, 2007)や Date らによるメッシュの細分化と簡略化を用いたメッシュ品質改善技術(Date, 2005)がある。特に Date らの方法は低品質メッシュを一時的に細分化した後に品質と形状近似性を考慮しながら要素の大きさを元に戻していくアプローチをとることで、品質改善を図る技術であり、ラプラシアンスムージング法と比較し、要素の接続関係も変更するので適用範囲は広い。

しかし、この方法では極端に品質の悪い要素、例えば体積がゼロや負になる要素が含まれている場合に、改善できないという課題がある。Fig. 6-26 を用いてこの一例を説明する。Fig. 6-26 (a)のメッシュに対して寸法 D1 を 10mm から 7mm に変更すると、Fig. 6-26 (b)のように要素が裏返り、体積が負になる要素が生成される。この体積が負の要素は細分割しても、体積は負のままであるので、メッシュ品質を改善できない。

このように自動メッシュ生成技術が進歩した結果、任意の形状に対してある程度の品質を確保したメッシュが生成できるようになり、かつ従来の品質改善技術により高品質化は可能となった。しかしメッシュモーフィングによって要素の裏返りなどの粗悪な要素が生成される場合には、従来の品質改善技術では対応できない。

また、メッシュ品質を改善する処理において目標とする品質は、メッシュ全体で一様ではなく、要求精度や解析規模に応じて変わってくる。例えば、注目して評価する箇所には高品質な要素を、薄板部には十分ではないが一応のレベルの品質の要素を作成するように、要求される品質はメッシュ全体で一様でない場合が多い。しかし、従来技術は要素品質を一定値以上に改善する技術であり、非一様な目標品質には対応していない。したがって、評価箇所に要求される品質でメッシュ全体を品質改善した結果、薄板部に対しても高品質な要素に改善され、節点数が膨大になる、もしくは薄板部に要求される品質で改善した結果、評価箇所の品質が十分でなくなるなどの課題がある。

本研究におけるメッシュモーフィングのためのメッシュ品質改善技術は、メッシュモーフィング後の四面体メッシュを対象にその品質を改善する技術であり、モーフィング前のメッシュ品質の分布を維持することを目標とした。尚、メッシュ品質の評価指標として本技術では要素ストレッチを用いる。

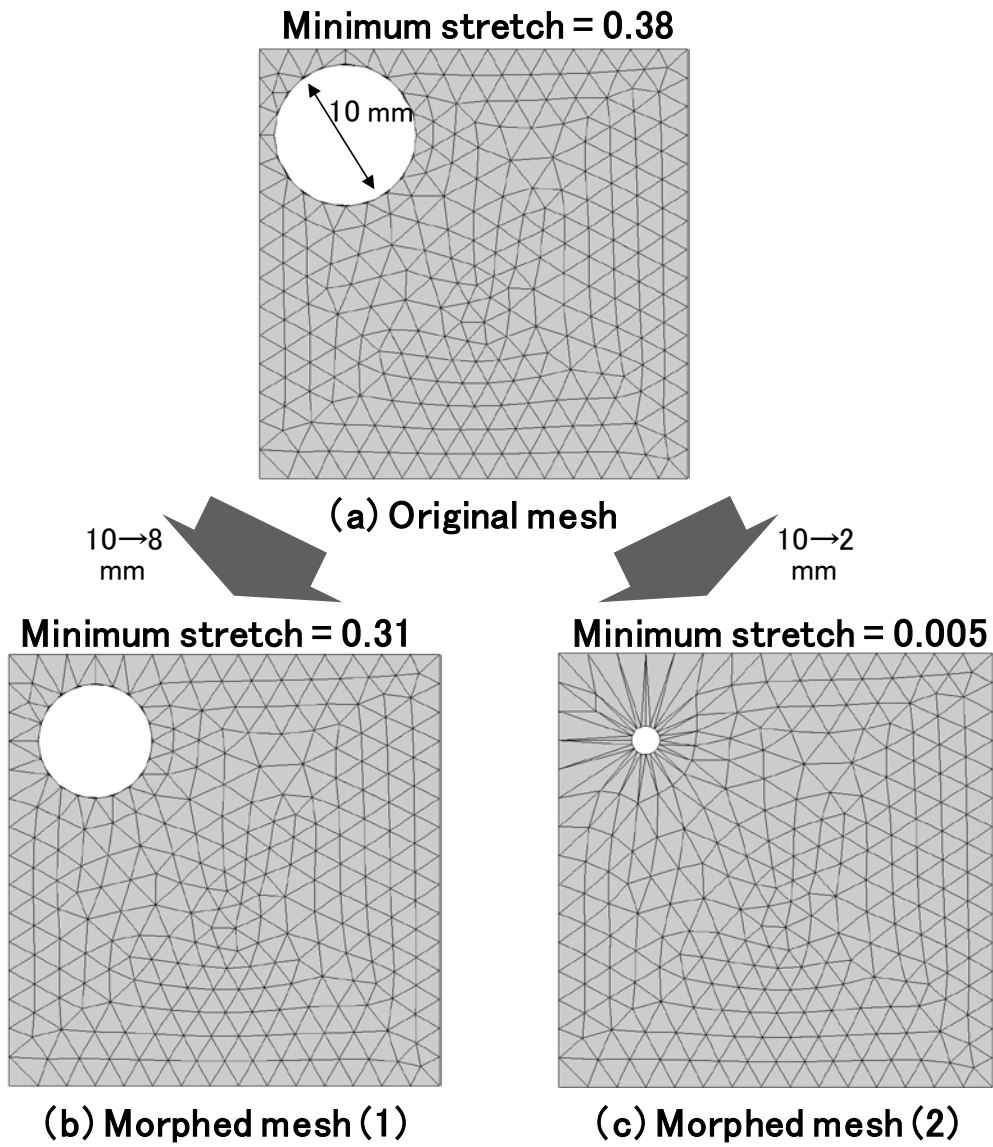


Fig. 6-25 Example of element quality deterioration due to mesh morphing (1).

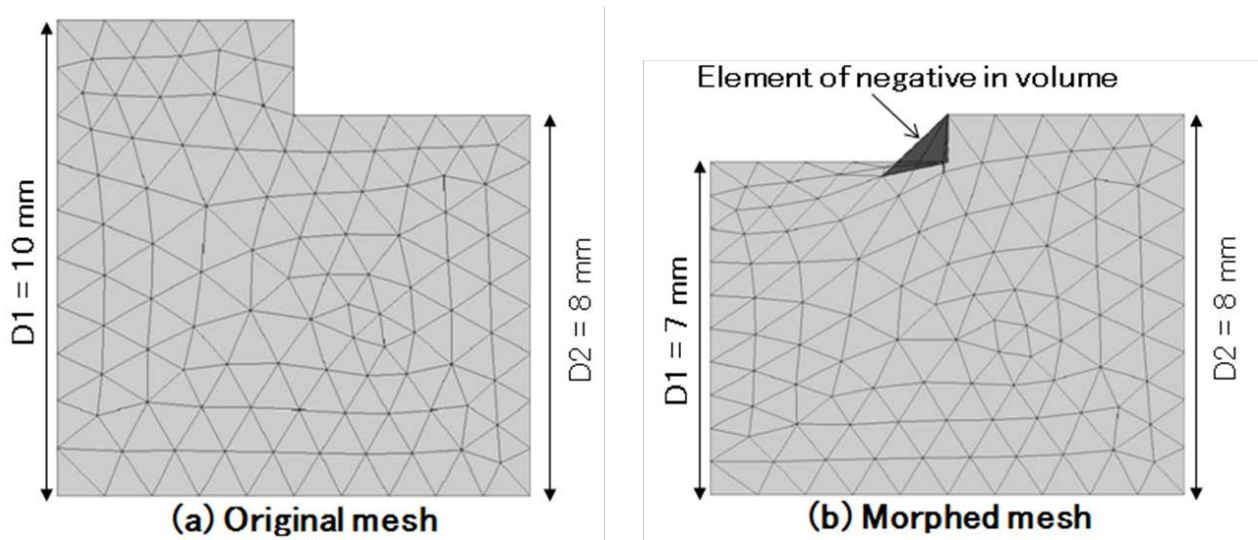


Fig. 6-26 Example of element quality deterioration due to mesh morphing (2).

6.7.2 メッシュモーフィング向け要素品質改善技術の概要

本研究では、前節で示した課題を解決するために、変形前のメッシュ品質を維持できるメッシュ品質改善技術を新たに開発した。これはメッシュモーフィング前後の要素品質を比較し、目標品質分布を決定し、各部位において目標品質以下の要素とその周辺の要素を削除し、この削除した空間に対して四面体メッシュを埋めることでメッシュ品質を改善する技術である。具体的には、低品質の要素およびこれに隣接する周辺の要素を削除し、この削除した要素群の境界要素面のうち、対象メッシュの外表面の要素面を品質改善し、これを境界として四面体メッシュを作成し、削除した空間を埋めることでメッシュ品質を改善する。また、四面体メッシュを作成した際に、目標品質以下の四面体要素を含んでいる場合は、削除した要素のさらに周辺の要素を削除し、再度四面体メッシュを作成する処理を繰り返す。

本技術は、メッシュモーフィング前の要素品質の分布を求め、これを目標品質としているので、解析実績があると想定されるモーフィング前の要素品質を維持できる。また、品質の悪い要素は一時的に削除しているため、体積が負の要素が残り続けることはない。これにより、変形量が大きいモーフィング操作を行っても品質が低下しなくなり、メッシュモーフィングの適用範囲を拡大できる。

本研究によるメッシュモーフィングのシステム構成とメッシュ品質改善技術の概略手順を図3に示す。

- (1) 目標品質分布決定部(Fig. 6-27(a))：メッシュモーフィング前の要素品質とメッシュモーフィングの要素の位置から目標品質分布を決定する。
- (2) 低品質要素削除部(Fig. 6-27 (b))：目標品質以下の要素および周辺の要素を削除する。
- (3) 表面三角形改善部(Fig. 6-27 (c))：削除要素群の境界要素面(三角形)のうち外表面の要素面を品質改善する。
- (4) 空間四面体メッシュ作成部(Fig. 6-27 (d))：削除した要素群の境界要素面を境界として四面体メッシュを作成し、削除した空間を埋める。
- (5) 目標品質以下の要素がなくなるまで、上記の(2)～(4)の処理を繰り返す。尚、低品質要素削除部においては、繰り返し回数に応じて、削除する周辺要素の領域を拡大する。

次節以降にて、これら各処理の詳細を説明する。

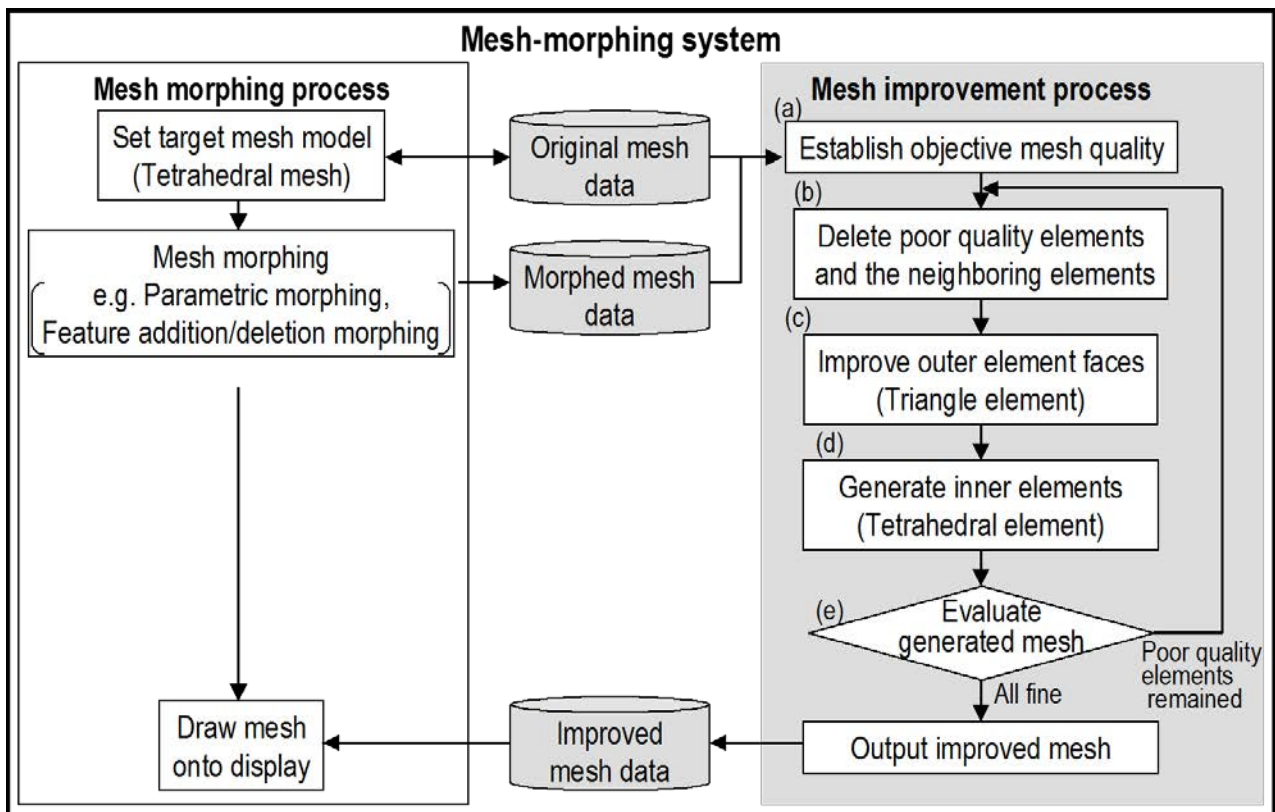


Fig. 6-27 Configuration diagram of element quality improvement technique for mesh morphing.

6.7.3 目標品質分布の導出

メッシュは部位ごとに適切な品質で作成されており、メッシュ全体で一様ではない。例えば、薄板部分に対しても一定の品質を満たすように(例えば、解析ソルバが推奨しているストレッチ 0.1 以上)メッシュ生成すると節点数が膨大となるので、十分ではないが一応のレベルでメッシュを作成し、解析精度が求められる評価点近傍等は高品質なメッシュを作成する。そこで、本研究では、メッシュモーフィング前の各要素に対して要素品質の分布を求め、これをメッシュモーフィング後の目標要素品質とすることとした。具体的にはメッシュモーフィング前の各要素の要素品質と圆心座標値を計算しておき、メッシュモーフィング後の各要素の圆心位置における要素品質をニアレストネイバー法(Shakhnarovich et al., 2006)で補間し、この値を目標要素品質とする。

Fig. 6-28 を用いて一例を説明する。尚、Fig. 6-28 は説明を簡単にするために、二次元図で説明するが、実際に扱うデータは三次元であり、図中の線は三角形を、また、三角形は四面体を示している。メッシュモーフィング前のメッシュと各要素の要素品質(ストレッチ)の分布図が Fig. 6-28 (a)、このメッシュに対して距離寸法 D1 を 3mm から 1.5mm に変更し、前述の方法により目標品質分布を計算した分布が Fig. 6-28 (b)である。右端部はモーフィング前のメッシュ品質が良いので目標品質は高く、左端部はモーフィング前の品質がそれ相応であるので目標品質は低く設定される。このようにモーフィング前のメッシュ品質分布を考慮した、メッシュ品質改善の目標を設定できる。従来のメッシュ品質改善手法では、モーフィング前のメッシュ品質分布を考慮できず、一様に品質改

善が施される。

例えば、Fig. 6-28 (a)の右端部の品質を目標品質として、従来手法により品質改善を行うと、Fig. 6-28 (c)に示すようなメッシュになる。モーフィング前の左端部のメッシュは目標品質が低く粗いメッシュとなっていたが、この改善処理により密なメッシュが生成され、解析規模の増大、すなわち解析計算所時間の増加をまねく要因となる。また、Fig. 6-28 (a)の左端部の品質を目標品質として、従来手法により品質改善を行うと、Fig. 6-28 (d)に示すようなメッシュになり、右端部のメッシュが改善されない。すなわち、解析精度を十分に満たすことができない。本開発技術を適用することにより、Fig. 6-28 (e)に示すような、モーフィング前の品質分布を維持したメッシュ品質の改善を行える。この点が、従来技術と比較した本技術の特徴である。

尚、本開発では補間方式では最も単純なニアレストネイバー法を用いたが、バイリニア法(Konno, 1981)やスプライン補間(大西, 1975)を用いると、より高精度な目標要素品質分布を導出できるものと考えている。

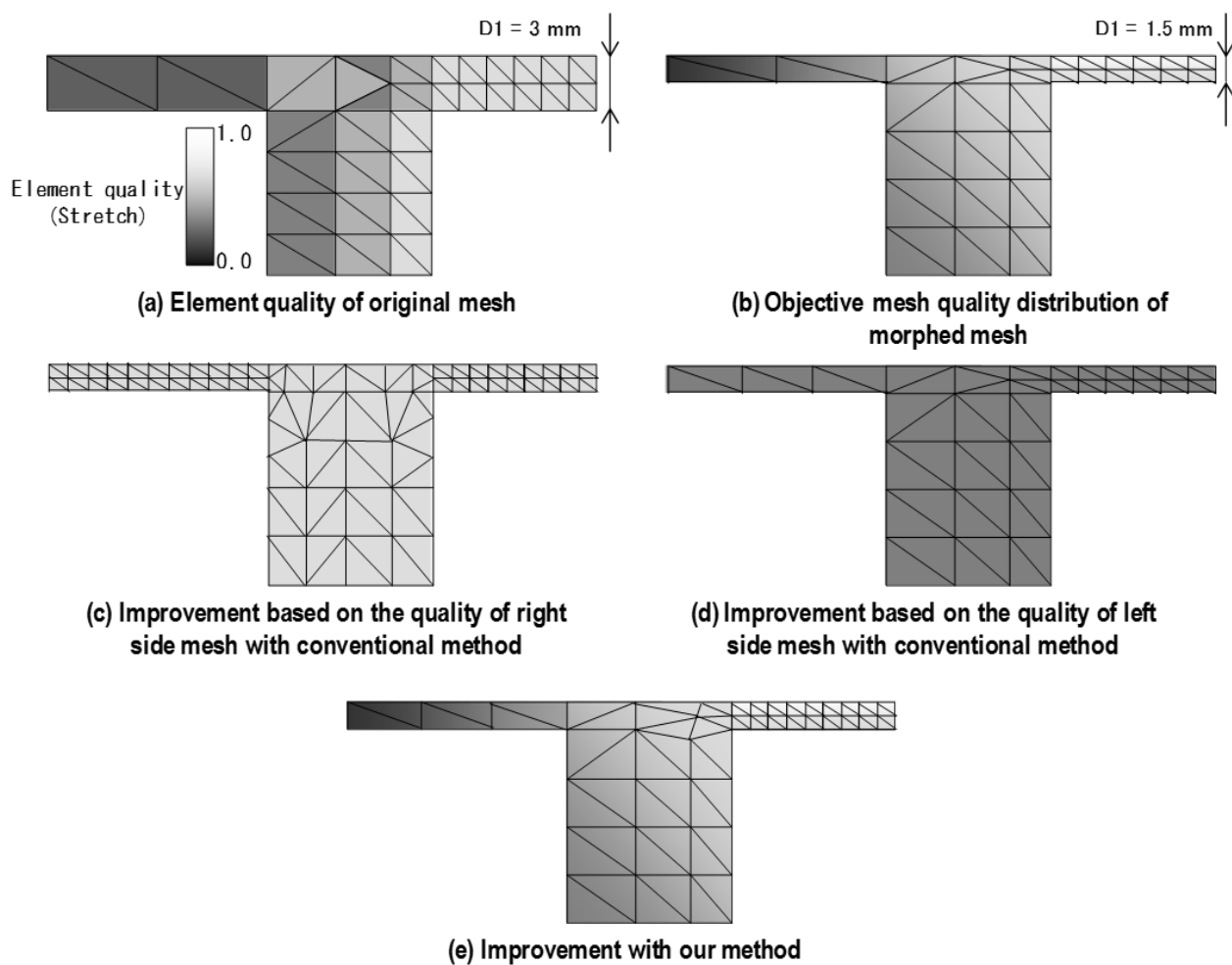


Fig. 6-28 Distribution chart of objective mesh quality.

6.7.4 低品質要素削除

モーフィング後のメッシュに対して、各要素の品質を計算し、要素の重心位置での目標品質を前節で示した方法で求め、要素品質が目標品質以下の要素を低品質要素として削除する。さらに低品質要素に隣接する数層の要素を削除する。Fig. 6-29 を用いて削除する要素について説明する。

まず、低品質要素を構成する節点を共有している要素([1]と記されている要素)を1層目の要素、さらに1層目の要素の構成節点を共有している要素を2層目の要素([2]と記されている要素)、順次3層目、4層目の要素とする。6.7.2 項にて示した通り、本処理は低品質要素がなくなるまで繰り返される。この際、繰り返し回数に応じて削除する要素の領域を拡大していく。初回の処理の際には1層目の要素を削除し、2回目の処理では2層目までと順次削除する層を拡大する。Fig. 6-29 (b)が初回の処理で要素を削除した結果、Fig. 6-29 (c)が2回目の処理で要素を削除した結果である。このように、目標品質を満たすまで削除する要素の領域を制御する。

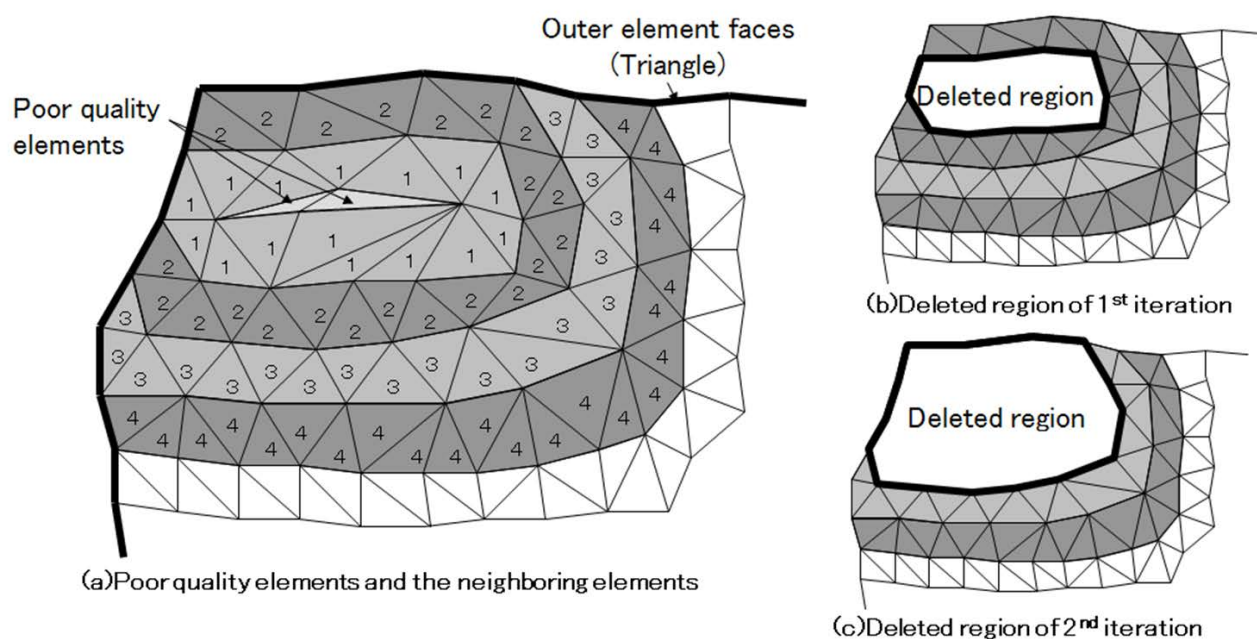


Fig. 6-29 Deletion of poor quality elements and the neighboring elements.

6.7.5 表面三角形改善

前節で示した処理において削除した要素群のうち対象メッシュの外表面の三角形(表面三角形)を品質改善する。具体的には Fig. 6-29 (b)(c)の太線部分に相当する表面三角形を品質改善する。表面三角形の品質が悪い場合は、これに対して四面体メッシュを作成しても歪みの大きい要素が作成される。モーフィング処理では表面三角形も伸びたり縮んだりし要素表面の品質も悪化する。そこで、まず表面三角形の品質を評価し、エッジ分割(Fig. 6-30(a))やエッジコラプス(Fig. 6-30(b)), エッジスワップ(Fig. 6-30(c))を繰り返すことで品質改善を行う。処理過程の一例を Fig. 6-31 に示す。Fig. 6-31 (a)は対象の表面三角形を示しており、また丸枠内の要素が、Fig. 6-28(b)で示した目標品質分布から

低品質と判定された表面三角形である。これに対して、要素エッジ長が長い要素に対してエッジ分割を施した結果が Fig. 6-31(b)に示す図である。さらに要素エッジ長が短い要素をエッジコラプスし、短い要素エッジを持たない要素をエッジスワップした結果が Fig. 6-31(c)に示す図である。このように、表面三角形の品質を改善することで、後に処理する空間四面体メッシュ作成部で表面三角形に依存した低品質要素が作成されないようにする。

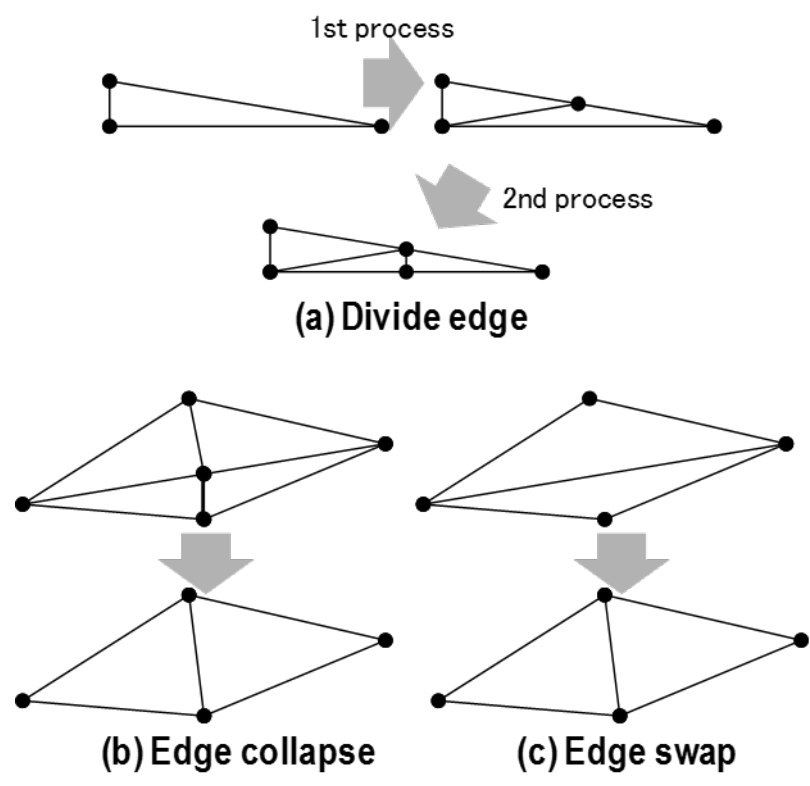


Fig. 6-30 Improvement of outer triangle.

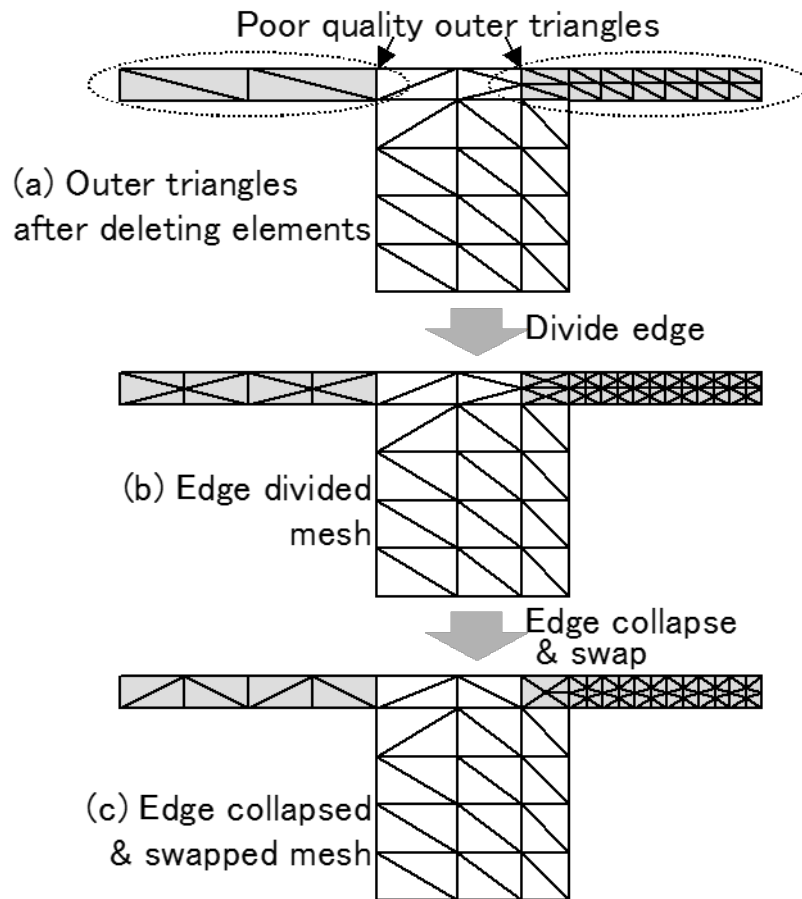


Fig. 6-31 Improvement of outer triangle process.

6.7.6 空間四面体メッシュ作成

低品質要素を削除し，削除した要素群の表面三角形を改善した後に，これを境界として四面体メッシュを自動生成する。

四面体メッシュの作成方法としてはアドバンスングフロント法(Ito et al., 2004)を採用した。空間四面体メッシュ作成処理では，削除対象にならなかった部位のメッシュと本処理で作成するメッシュは連続的に接続する必要があるため，メッシュ表面三角形の保持が必須である。一方で，デローニー法(Borouchaki et al., 1995)や八分木法(Shephard et al., 1988)では完全に表面三角形を保持することが困難である。また，八分木法では，段階的に要素を細分化することで，要素の大きさ(要素サイズ)を制御するので，目標要素品質を満たすために必要以上に小さな要素が生成され，要素数が多くなる。デローニー法も同様である。本開発ではメッシュ表面三角形を保持でき，節点配置位置を自由に制御できるアドバンスングフロント法を採用した。アドバンスングフロント法における境界(フロント)前進時に，6.7.3 項に示す方法で計算した要素品質を満たさない要素が生成された場合，フロント前進順番を変更する，または前進距離を調整することで目標要素品質を満たすようにした。

一例を Fig. 6-32 と Fig. 6-33 に示す。Fig. 6-29(c)で示した要素を削除した空間に対して，本技術により四面体メッシュを作成した結果が Fig. 6-32 に示す図である。この図に示すように要素を削除し

た空間の境界と，作成した四面体メッシュの境界(白色部と灰色部の境界の太線部)は一致する必要がある，本技術により実現した．アドバンシングフロント法によるフロント前進の過程を Fig. 6-33 に示す． Fig. 6-33 (b)に示すようにフロント前進の過程で品質の悪い要素が作成されることがある．このような低品質要素が作成された場合は， Fig. 6-33 (b)に示すようにフロント前進を一段階戻す．その後，先に作成した順番と異なる順番でフロント前進する．この結果 Fig. 6-33 (d)に示すようなメッシュとなり， Fig. 6-33 (b)にあったような低品質要素の生成を抑えている．

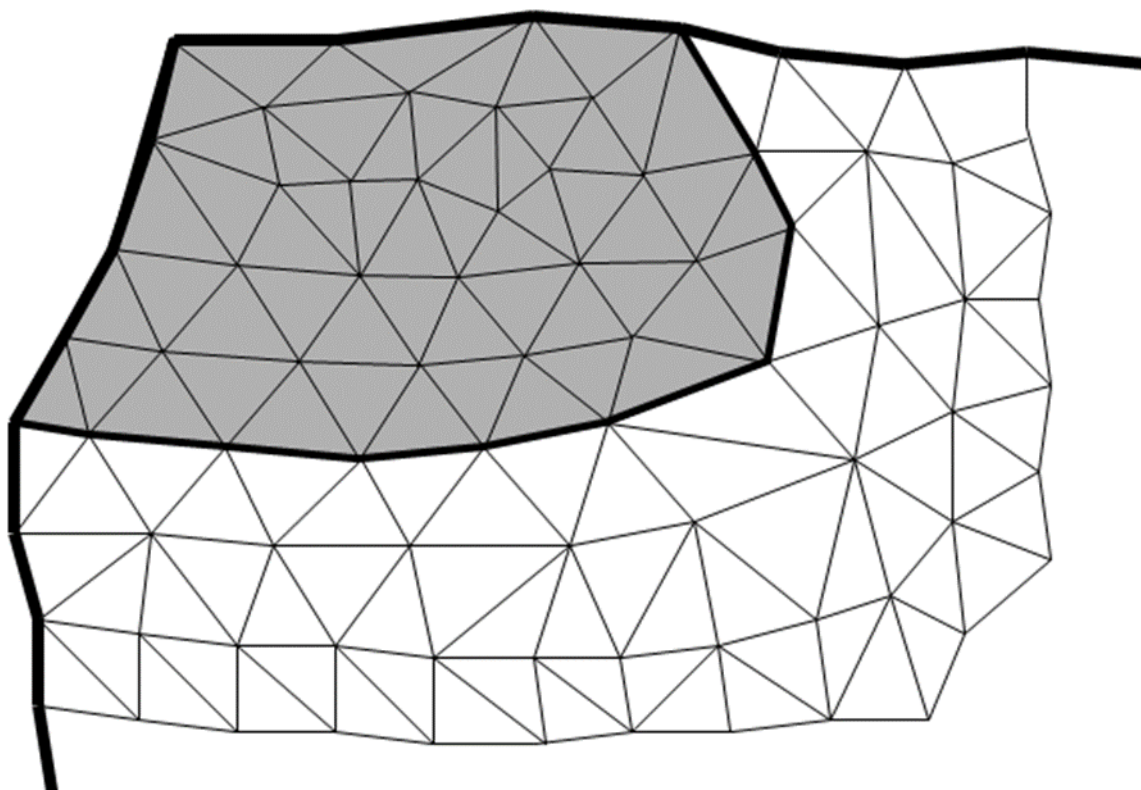


Fig. 6-32 Generation of inner elements.

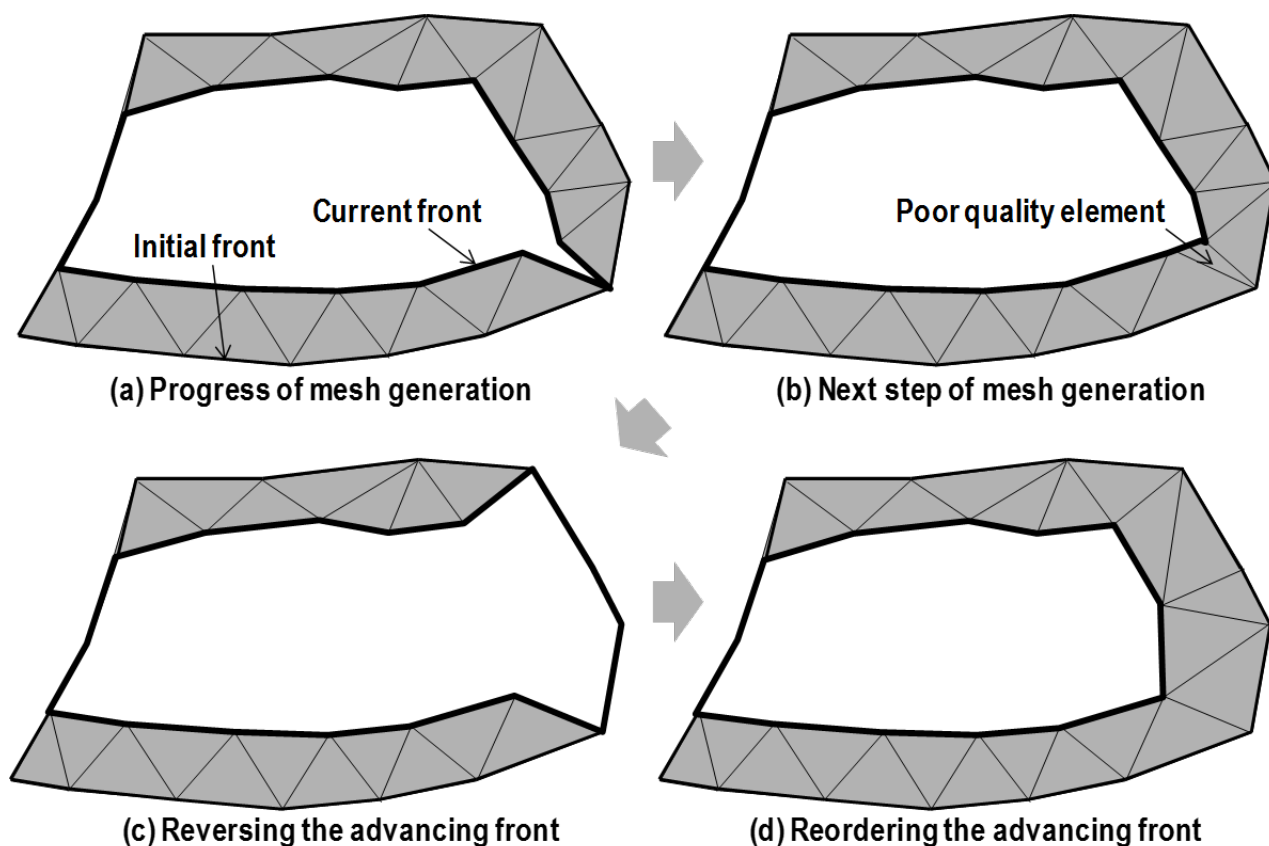


Fig. 6-33 Procedure of "Advancing Front Method".

6.7.7 メッシュ品質改善技術の適用と検証

ブラケット部品に対して、メッシュモーフィングを行い、さらに本技術によりメッシュ品質を改善した結果を Fig. 6-34 に示す。Fig. 6-34 (a) に示す画像はメッシュモーフィング前のメッシュであり、約 3 万節点である。また、最低要素ストレッチは 0.13 であり、一般的な解析を行うには十分である。また要素 A のストレッチは 0.35 である。このメッシュに対して、フランジ部の厚みを 10mm から 15mm に変更するパラメトリックメッシュモーフィングを実施した結果が Fig. 6-34 (b) に示す画像である。節点 A の付近で要素品質が悪化し、最低要素ストレッチは要素 A が 0.10 となっているが、まだ許容範囲である。さらに、フランジ部の厚みを 10mm から 20mm に変更するパラメトリックメッシュモーフィングを実施した結果が Fig. 6-34 (c) に示す画像である。この場合、要素 A が反転し、体積が負の要素(要素ストレッチは 0.0 として計算)が作成される。このようにメッシュの変形量が大きいと品質が大きく悪化する。そこでこの Fig. 6-34 (c) に示したモーフィング後のメッシュに対して、本技術によりメッシュ品質を改善した結果が Fig. 6-34 (d) に示す画像である。最低要素ストレッチが 0.12 と大幅に改善し、節点 A が帰属する要素においては最低要素ストレッチが 0.31 となり、メッシュモーフィング前の要素品質とほぼ同程度になった。尚、このメッシュ品質改善に要した処理時間は 18 秒 (Intel(R) Core i5TM 2.0GB Memory) であり、従来技術と同等であることを確認した。

オイルポンプハウジング部品に対して、メッシュモーフィングを行い、さらに本技術によりメッ

シユ品質を改善した結果を Fig. 6-35 に示す。Fig. 6-35 (a) に示す画像はメッシュモーフィング前のメッシュであり、約 33 万節点である。このメッシュデータは領域 A の部分に対して、高密なメッシュを作成し、高品質な要素を作成している。この部分の平均要素ストレッチは 0.38 である。このメッシュに対して寸法を 16mm から 22mm に変更するパラメトリックモーフィングを実施した結果が Fig. 6-35 (b) に示す画像である。メッシュ全体での最低要素ストレッチは 0.11 と許容範囲であるが、領域 A の部分のメッシュにおいては平均要素ストレッチが 0.14 と悪化している。このメッシュモーフィング後のメッシュに対して、本技術によりメッシュ品質を改善した結果が Fig. 6-35 (c) に示す画像である。この画像から確認できる通り、メッシュモーフィング直後は伸びていた要素が分割され改善されていることを確認できる。

また、領域 A の部分の平均要素ストレッチは 0.35 となり、メッシュモーフィング前の要素品質とほぼ同程度になった。尚、このメッシュ品質改善に要した処理時間は 64 秒 (Intel(R) Core i5TM 2.0GB Memory) であり、従来技術と同等であることを確認した。

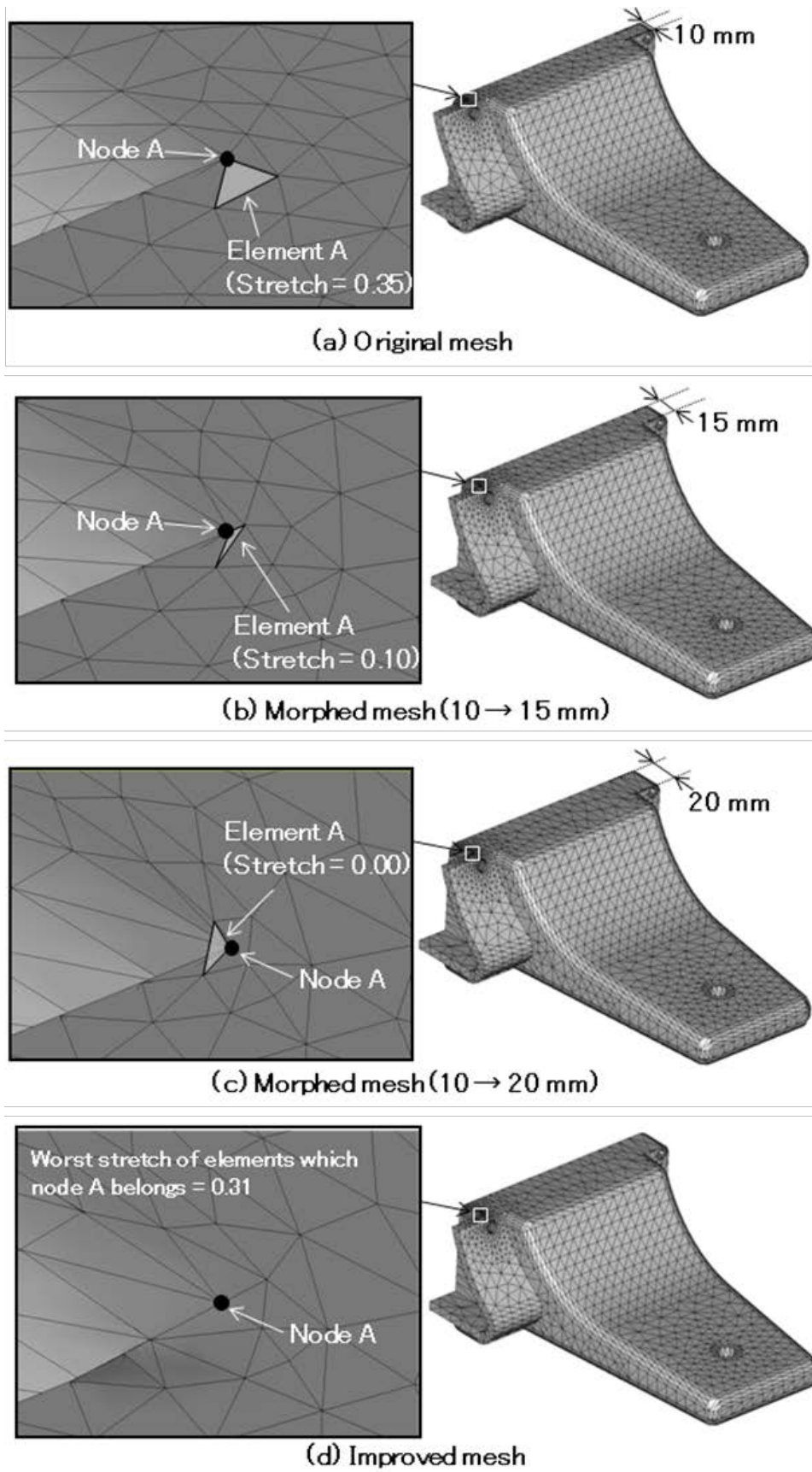


Fig. 6-34 Example of improved mesh for bracket model.

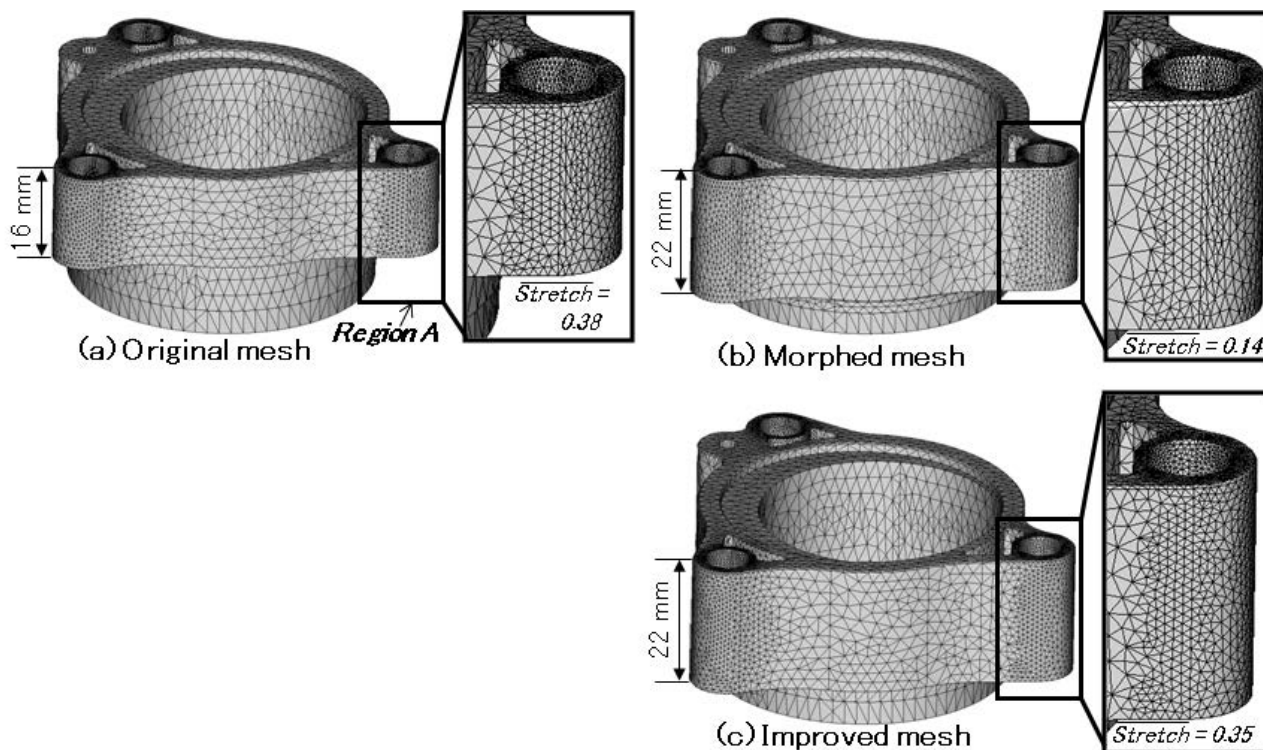


Fig. 6-35 Example of improved mesh for oil pump housing model.

7. 適用と検証

Fig. 7-1 (a) ~ (c) に示すノウハウデータ（ノウハウモデルとメッシュ）がノウハウ DB に登録されており，Fig. 7-1 (d) に示す新設計 CAD データ(自動車ドアスイッチカバー)のメッシュ作成手順と結果について説明する．新設計 CAD データには複数の類似部分形状があるが，各形状は，寸法の変更，フィレットの追加など，完全に一致しない部分形状も意図的に加えている．また，スナップフィットのような厳密な中立面がない形状も含まれており，従来技術や最新ツールを用いてもインタラクティブなメッシュ作成・修正作業が必要な CAD データである．これは 4~8 時間程度の作業時間を要する．

本技術では，まず始めに新設計 CAD データからノウハウ形状に類似する部分形状を検索する．部分形状類似度(以降，類似度と称す)が 0.8 以上となった部分形状をノウハウ形状と同じ色で対応付けた画像を Fig. 7-1 (e)に示す．また，ノウハウ形状と部分形状の類似度を Table 7-1 に示す．なお，本適用においては，面積と周長を幾何パラメータとして使用し，それぞれの重みは 0.5 に設定している．完全に一致する部分形状は類似度 1.0 として，部分形状の大きさ(寸法)や位相が異なる(フィレット追加)部分形状は類似度が 0.8 以上になっていることを確認した．ノウハウ形状 #1 と類似部分形状[a2]は完全に一致する形状であるので，類似度は 1.0 である．一方，ノウハウ形状 #1 のリブの高さは 10mm であるのに対して，部分形状[a1, a3, a4]のリブ高さは，それぞれそれぞれ 11mm, 9mm, 8mm である．部分形状[a1]と[a3]は最も類似しており，[a4]は最も類似していない部分形状で

ある。計算された類似度はそれぞれ 0.93, 0.94, 0.90 であり、長さ寸法の差を類似度として考慮できていることを確認した。ノウハウ形状#2 と類似部分形状[b1]は完全に一致する形状であるので、類似度は 1.0 と正常に計算できた。類似部分形状[b2, b3, b4, b5]は爪部の角にフィレットがついており、位相は一致していないが、類似度はそれぞれ 0.97, 0.97, 0.94, 0.81 であり、位相の差を類似度として考慮できていることを確認した。ノウハウ形状 #3 と類似部分形状[c3]は完全に一致する形状であるので、類似度は 1.0 である。一方、ノウハウ形状 #3 のフィレット半径は 2mm であるのに対して、部分形状[c1, c2, c4, c5]のフィレット半径は、それぞれそれぞれ 4mm, 3mm, 1mm, 0.5mm である。計算された類似度はそれぞれ 0.94, 0.97, 0.99, 0.97 であり、半径寸法の差を類似度として考慮できていることを確認した。また、ノウハウ形状 #1 に示したノウハウ形状に対して、類似度が 0.8 未満となった部分形状の一例を Fig. 7-2 に示す。この部分は、位相は一致しているので位相類似度は 1.0 であるが、面積や周長は異なるため幾何類似度は 0.32 となり、部分形状の類似度は 0.66 であった。この部分形状はノウハウメッシュ #1 を再利用できる部分ではないので、この結果は妥当であると考えられる。

続いて、類似部分形状を新設計 CAD データから削除し、穴埋めした CAD データ(ベース形状：Fig. 7-1 (f))を作成し、これに対して解析用中立面自動生成技術を用いて、中立面を作成し、これにメッシュ(ベースメッシュ)を作成する(Fig. 7-1 (g))。本例では裏側面(突起物のない意匠面側)を基準に中立面を作成している。さらに、このベースメッシュに対して、ノウハウメッシュを配置し(Fig. 7-1 (h))、メッシュ追加削除モーフィング技術を用いてこれらのメッシュを結合する。この結果、Fig. 7-1 (i) に示すメッシュとなり、従来手法では必要だったインタラクティブなメッシュ修正作業が不要な十分な品質および仕様を満たしたメッシュであることを確認した。このように実績のある解析モデルから抽出したノウハウモデルを再利用するので、過去と同じ水準の品質でメッシュ生成できる。なお、本技術を用いた一連のメッシュ作成処理時間は 2 分未満だった。

また、作成すべきメッシュの仕様が改良された場合、自動化技術や開発ソフトウェアを改修しなくても、ノウハウ DB に登録するノウハウメッシュを変更するだけで、仕様に沿ったメッシュを作成できることが、本技術の特長である。

なお、本論文では幾何類似度や部分形状類似度のしきい値として 0.8 を採用して検証したが、4.5 節で述べた通り、メッシュサイズとして許容する範囲などのメッシュに要求される仕様の観点からノウハウ DB に登録するノウハウ形状とメッシュ、およびしきい値を検討することが望ましい。

また、Gunn の先行研究によると 40%が既設計部品の流用、40%が既設計部品の修正であり(Gunn, 1982), ノウハウ DB を拡充することで最大 80%程度の部分を流用できるようになるものと考えられる。

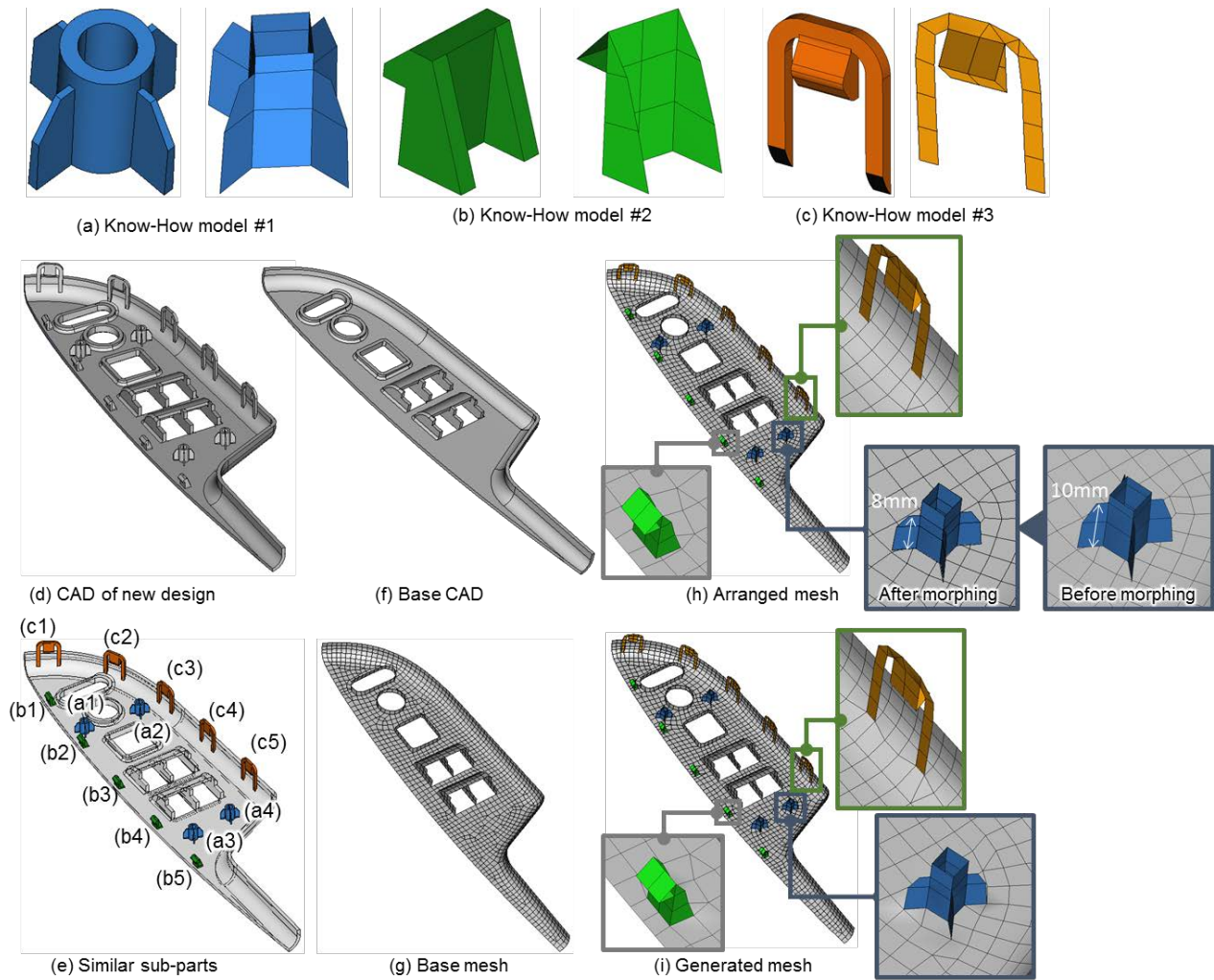


Fig. 7-1 Application result to automotive door switch panel cover parts.

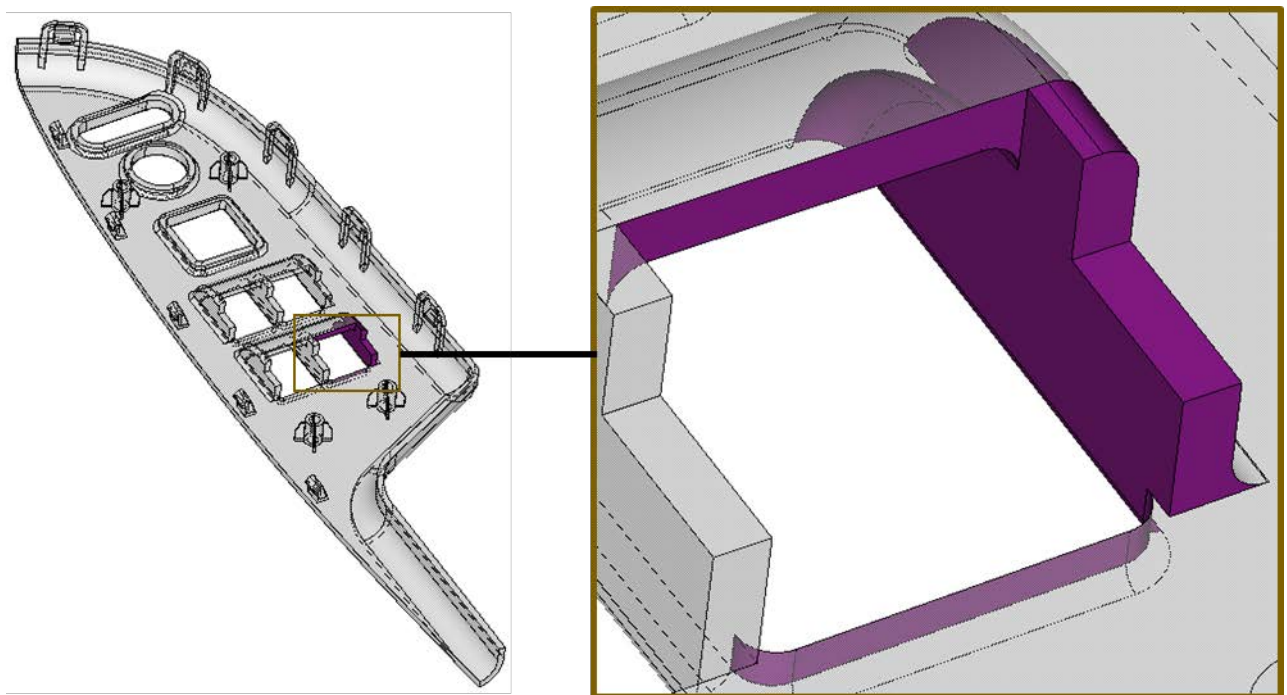
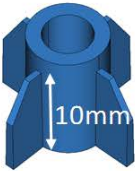
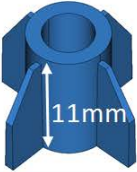




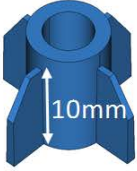


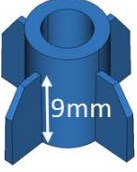


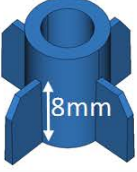






Fig. 7-2 Example of partial shape with low similarity.

Table 7-1 Similarity in this application example.

Know-How Model	Similar Sub-parts	Score	Know-How Model	Similar Sub-parts	Score	Know-How Model	Similar Sub-parts	Score
	a1 	0.93		b1 	1.00			0.94
	a2 	1.00		b2 	0.97			0.97
	a3 	0.94		b3 	0.97			1.00
	a4 	0.90		b4 	0.94			0.99
				b5 	0.81			0.97

8. 結 論

8.1 全体的な成果

自動車や電機など製造業においては、CAE(Computer Aided Engineering)を用いて試作の一部を代替し、短時間で信頼性の高い製品を提供する取組みを行っている。ここで課題となるのが解析モデルの作成であり、経験やノウハウに基づくなど属人性が高く、また、解析精度を保証するためにメッシュ品質の仕様が部位毎に細かく規定されておりメッシュ作成工数が膨大になることが課題となっている。本研究では、この課題を解決するために、複雑な曲面や突起形状を有する構造物への高精度解析モデル生成技術を開発した。本技術は新設計のCADデータと過去のCADデータを比較し、再利用可能な部分形状を検索する類似部分形状検索技術、厚みのあるソリッドモデルから解析用の厚みのない板構造である中立面を生成する解析用中立面自動生成技術、既存のメッシュを変形させて新設計形状のメッシュを作成できるメッシュモーフィング技術、の3つのコア技術から構成される。実績のある過去の解析データをデータベース化し、新設計形状の解析モデルに部分的

に再利用し組み合わせることで、過去データと同水準の高品質解析モデルを自動生成できることが特長である。自動車ドアスイッチカバー部品に適用し、従来は 4～8 時間程度の時間を要していたメッシュ作成作業を 2 分未満と大幅に削減できることを確認した。

8.2 類似部分形状検索技術に関する成果

境界表現 3D-CAD モデルを対象として類似している部分形状を検索する技術を開発し、以下の結論を得た。

- (1) 検索キーとなる形状に対して作成したグラフと、検索対象の 3D-CAD モデルに対して作成したグラフを比較し、類似度を計算する手法を開発した。面積や周長などの幾何情報に基づく幾何類似度と面の接続関係(位相情報)の差異に基づく位相類似度を計算し、これらの線形和を類似度として計算する。
- (2) 幾何類似度と位相情報から類似している部分グラフを高速に検索する手法を開発した。

8.3 解析用中立面自動生成技術に関する成果

3次元CADで作成した薄板構造のソリッドモデルに対しても効率的に解析することを目的に、ソリッドモデルから解析用の中立面モデル自動生成技術の開発を行い、以下の結論を得た。

- (1) 薄板部の対向面をペア面として認識し、ソリッドモデルにおける各面の接続関係とペア面の接続関係に基づいて、リブ面及び薄板部の対向関係の面グループを認識していることにより、リブのあるソリッドモデルに対しても、中立面モデルを作成可能とした。
- (2) 従来技術では幾何的な中央に中立面モデルが作成され、解析種類に応じた中立面モデルを生成できなかった。本技術では操作者の指定により解析種類に応じて、解析モデルとして等価な中立面モデルを作成可能とした。
- (3) 表側面及び裏側面の認識が操作者の望むものと異なる場合にも、対向関係を指定することで修正することができ、任意のソリッドモデルから中立面モデルを作成することが可能である。
- (4) ブラケット部品と携帯電話上カバー部品に適用し、本開発技術の有効性を明らかにした。

8.4 メッシュモーフィング技術に関する成果

メッシュに対して曲面の種類やパラメータおよび寸法拘束や幾何拘束を付与し、この寸法拘束や幾何拘束を保持したまま、寸法変更や、フィーチャの追加や削除、指定形状へのフィッティングを行うことでメッシュを変形できるパラメトリックメッシュモーフィング技術を開発した。

- (1) メッシュの外表面の要素面に対して幾何特徴として曲面の種類やパラメータ、および幾何拘束として幾何特徴間の関係(平行/垂直や接線連続)を自動認識する技術を開発した。
- (2) 幾何特徴または幾何特徴間に対して変形後形状の寸法値(寸法拘束)を指示し、この幾何特徴

と幾何拘束，寸法拘束を制約としてメッシュを変形させるパラメトリックメッシュモーフィング技術を開発した。

- (3) メッシュベースでリブやボス，穴の追加や削除が可能にするために，外形形状定義部とフィーチャメッシュ作成部，メッシュ集合演算部から構成されるフィーチャ追加削除モーフィング技術を開発した。
- (4) 指定された変形後対象形状にメッシュをフィッティングさせるフィッティングモーフィング技術を開発した。
- (5) メッシュモーフィング後のメッシュに対して適用可能な要素品質改善技術を開発した。

8.5 今後の展開

第7章の適用と検証では，類似度が0.8以上の部分形状のメッシュを再利用している。また，4.8節においては，類似度が0.8以上と0.725の部分形状の差異を示している。このように，本検証で用いた例では0.8を再利用可否のしきい値としたが，この値を様々な構造に用いることができるわけではない。現状では部分形状ごとに再利用可否のしきい値を試行錯誤の上で決定している。

そこで，この試行錯誤をなくすために，AI的な手法や最適化手法を用いて自動化することが考えられる。例えば，再利用可否のしきい値を説明変数，作成されたメッシュの品質を目的変数として，最適化問題を解くと良い。

9. 開発技術の応用展開と展望

9.1 概要

本研究では，CAEをより効率よく実施するために経験やノウハウに基づいたメッシュを自動生成する技術を開発してきた。一方で，設計をより効率よく実施するためには，経験やノウハウを設計ルール化し，ルールベースで設計を自動化していく取り組みを各企業強化していくものと考えられる。その一つがDfX(Design for X，製造容易性(Design for Manufacturability)，組立容易性(Design For Assembly)，環境負荷性(Design For Environment)，保守容易性(Design For Maintenance)などの総称)(Wu et al., 2015) (針谷, 2012) (Nelson, 2016)の取り組みである。板金加工において，穴と曲げの間隔は一定値以上確保しないと，曲げ加工時に穴がゆがむ，アーク溶接において，要素ビード長さはX1mm以上確保しないと接合強度不足となり，X2mm以下にしないと入熱量が増加し熱変形(反り)が発生するなどの，設計後工程で発生しうる課題・不具合を設計ルール化し，設計段階で気づかせてあげる仕組みが重要になると考えている(小野寺他, 2019)。これは，設計者にとって，数多くある設計ルールの全てを把握することは，特に経験の浅い設計者にとっては困難であり，また，設計部門や品質管理部門，製造部門などの関係者でデザインレビューなどを行っても全件を指摘することは難し

いためである。設計ルールの代表的な例を Fig. 9-1 を用いて説明する。

本例は、射出成型で製造される樹脂部品における突起形状の製造性に関する設計ルールである。突起部の肉厚 t がベース部の肉厚 T と比較して、厚すぎるとヒケと呼ばれる成形収縮によって表面に陥没した部分ができる場合がある。このようなヒケが発生すると、意匠性を損なうとともに、強度としても好ましくないので、発生しないように設計しなければならない。このような汎用的な設計ルールは 300 程度あるとの報告もある(HCL technologies)。さらには、このような汎用的な設計ルールだけではなく、各社がノウハウとして蓄えてきた個別の設計ルールも存在する。たとえば、このヒケに関するルールに関しても、意匠が重要な部位(人の目に見える部位)は小さなヒケも許されないで、厳しいしきい値を設ける。一方で、他の部品と接していて人の目に見えない部位では、多少のヒケは問題ないので、緩いしきい値を設ける。このように、各社ごと、製品や部品ごとに設計ルールは様々なものがある。そこで、このような多種多様な設計ルールに対して、3D-CAD 上で自動チェックを可能とし、また各社のノウハウに基づく設計ルールを実装可能な気づき支援 CAD システムを開発している。図 2 に気づき支援 CAD システムの構成図を示す。穴や接線連続部、類似形状などの特徴的な形状を認識する「形状認識機能」や、面や線などの形状要素の距離や角度、曲率などの幾何パラメータを計測する「幾何特徴量計算機能」、その他、投影や交差などでデータム形状(計測の基準となる形状)を作成する機能などを含んでいる「標準機能ライブラリ」、設計ルールのチェック手順を標準機能の組み合わせで表現した「デジタルイズドルール」、違反箇所や設計ルールの根拠となる文書を CAD 画面上に表示する「CAD インターフェース」から構成される。本論では、このうち「標準機能ライブラリ」と「デジタルイズドルール」に関して説明する。


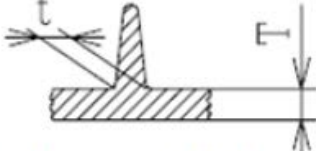
Bad case	Good case	Parameter
 <p data-bbox="201 1496 603 1532">Thick rib causes sink marks.</p>	 <p data-bbox="699 1496 1193 1572">Rib thickness must be thinner than base thickness.</p>	$t \leq \frac{3}{5} T$

Fig. 9-1 Example of partial shape with low similarity.

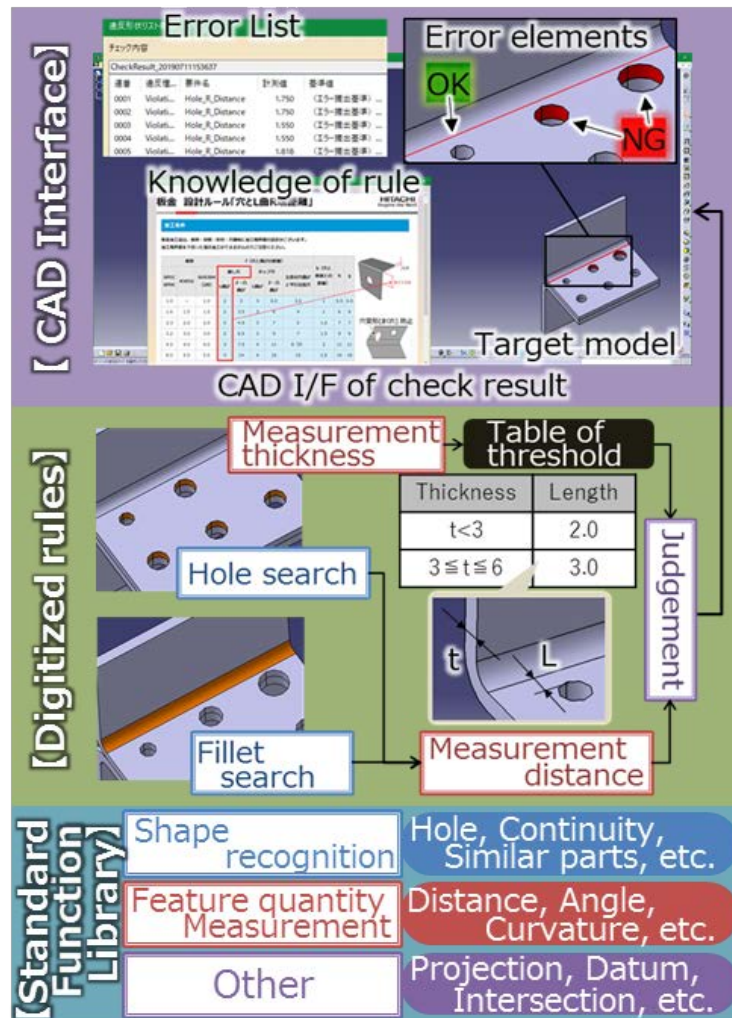


Fig. 9-2 Briefing chart of “Design Insight CAD System”.

9.2 標準機能ライブラリ

標準機能として「形状認識」，「幾何特徴量計算」，「その他」の3種類を開発した。各種の機能は入力と出力を指定する手段を備えており，たとえば，対象となる形状や計算種別などを入力として指定し，検索された形状や特徴量などを出力することができる。また，ある機能の出力を別の機能の入力として指定することで，チェック手順を定義できるようになっている。これらの使い方については，次節のデジタライズドルールにて示す。

形状認識としては Table 9-1 に示す 10 種類の機能を実装した。#1 の[Attribute]機能では，CAD データの属性情報として設定された部品番号や材料種別などの情報から形状を検索できる。#6 の[Hole]機能では，ソリッドモデル(厚みのあるモデル)やサーフェスモデル(板金部品など薄肉構造物の片側面だけのモデル)から穴を検索することができる。#9 の[Similar part]では，検索キーとして指定した形状と類似の形状を検索することができる。

幾何特徴量計算機能としては Table 9-2 に示す 7 種類の機能を実装した。#3 の[Curvature]機能では，曲面や曲線の曲率を測定できる。また，曲率としては，主曲率の最大/最小，ガウス曲率などの

各種曲率を計算できる。また、面毎に面内最大/最小の曲率を計算し、その点の座標と曲率値を出力することもできる。このような計算種別は本機能の入力オプションとして指定できるようにしている。#5の[Distance]機能では、立体(ソリッド)、面、線、点の各形状要素間の距離を測定できる。また、面群と線群が指定された場合は、最小値のみ出力したり、全組み合わせの距離を出力したり、などの計算種別を入力オプションとして指定できるようにしている。

その他機能としては Table 9-3 に示す 8 種類の機能を実装した。#1の[Center]機能では、穴や円弧、円筒の中心を計算できる。円弧などの線が指定された場合は、中心は点で出力され、円柱などの面が指定された場合は、中心は線(軸)で出力される。また、複数の形状要素の図心を計算することもできる。#5の[Primitive shape]機能では、平面や円筒、直線、円などの基本形状を作成できる。

なお、これらの機能は現時点で開発済みのものであり、今後必要に応じて増えたり、統廃合されていく。

Table 9-1 Functions of shape recognition.

#	Functions	Description
1	Attribute	Search for shapes by attribute information such as part numbers, materials, draft/press direction, etc.
2	Continuity	Search for shapes by position continuity, tangent continuity, and curvature continuity
3	Coordinates	Search for shapes by absolute or relative coordinates
4	Direction	Search for shapes by face normal or edge orientation
5	Fillet	Search for fillet faces
6	Hole	Search for shapes of hole
7	Neighboring	Search for nearby shapes
8	Side end	Search for shapes of edges or faces of sheet metal parts
9	Similar part	Search for similar part shapes
10	Welding line/point	Search for welding lines and points

Table 9-2 Functions of feature quantity measurement.

#	Functions	Description
1	Angle	Measure angle between shape elements such as lines and faces
2	Area	Measure face area
3	Curvature	Measure curvature of faces and edges
4	Diameter	Measure diameter of hole, arc, etc.
5	Distance	Measure distance between shape elements such as edges and faces
6	Length	Measure edge length
7	Thickness	Measure thickness of sheet metal parts and thin structures.

Table 9-3 Other functions.

#	Functions	Description
1	Center	Calculate center of hole, arc or cylinder. And, calculate centroid of any shapes.
2	Division	Divide edges and faces
3	Intersection	Calculate intersection of faces and edges
4	Normal/Tangency direction	Calculate direction of normals and tangents
5	Primitive shape	Create primitive shapes such as planes, cylinders, and straight lines
6	Projection	Project points and edges into shapes such as faces
7	Set operation	Calculate set operations such as union, difference and intersection with shape data
8	Table reference	Refer to the table and get the value

9.3 デジタライズドルール

デジタライズドルールとは設計ルールのチェック手順を標準機能の組み合わせで表現したものである。「穴と角 R(コーナーにつける丸み)の距離を 3mm 以上確保する」という設計ルールを例にチェック手順を表現する方法を説明する。まず、この設計ルールのチェック手順は下記の 3 手順となる。

1. 穴を検索する
2. 角 R(フィレット)を検索する
3. 穴とフィレットの距離を測定する

1 手順目の「穴を検索する」は形状認識の穴検索(#6 Hole)機能に相当する。同様に「フィレットを検索する」は形状認識のフィレット検索(#5 Fillet)機能に相当する。本ルールはソリッドモデルが対象となることを想定しているため、穴もフィレットも面となる。したがって、「穴とフィレットの距離を測定する」は幾何特徴量計算の距離(#5 Distance)における面と面の距離を測定する機能に相当する。なお、自動車のボディー部のような板金部品の場合、片側面のみを CAD 上で作成している企業も多くあり、サーフェスモデルとなることもある。この場合、穴は線で構成されるので、「穴とフィレットの距離を測定する」は線と面の距離を測定する機能に相当することとなる。

この手順をデジタライズドルールとして定義すると Table 9-4 に示す表現形式になる。まず、手順 1 の穴検索機能は、入力 1 は検索範囲(検索対象形状)、入力 2 は検索最大穴径、入力 3 は検索最小穴径、入力 4 は形状種、出力 1 は検索結果形状(穴を構成する面)を指定する仕様となっている。Table 9-4 に示した入出力の意味することは、「すべての範囲から直径 0.0mm~100.0mm のソリッド形状にある穴を検索し、穴を構成する面を” Out11” という変数に代入する」、ということである。このような仕様は各機能ごとに定義されているので、これにしたがって、入出力を定義する。同様に手順 2 のフィレット検索機能は、入力 1 は検索範囲(検索対象形状)、入力 2 は検索最大フィレット半径、入力 3 は検索最小フィレット半径、出力 1 は検索結果形状(フィレットを構成する面)を指定する仕様となっており、「すべての範囲から半径 0.0mm~100.0mm のフィレットを検索し、フィレットを構成する面を” Out21” という変数に代入する」、ということである。手順 3 の距離測定機能は、入力 1 は測定する形状の種類、入力 2 は測定対象の一方の形状、入力 3 は他方の形状、入力 4 は測定組み合わせタイプ、出力 1 は距離、出力 2 は測定対象となった形状を指定する仕様となっている。したがって、「面と面の距離として、Out11=穴を構成する面と Out21=フィレットを構成する面の距離を全組み合わせで計算し、距離を” Out31”、測定対象形状を” Out32” という変数に代入する」ということである。

最後に判定基準と 3D-CAD 上でハイライトする形状を指定する。入力 1 は比較タイプ、入力 2 は比較対象、入力 3 は比較基準値、入力 4 はハイライト対象形状を仕様となっている。したがって、「Out31(=距離)が 3mm 未満の Out32(=測定対象形状=穴とフィレットの面)をハイライトする」ということである。

このように設計ルールを 3D-CAD 上で計測する作業手順にそって、標準機能の実行手順を定義することで、設計ルールの自動チェックが可能になる。

このデジタルイズドルールを電源ボックスのハウジングに適用して結果を Fig. 9-3 に示す。このように違反箇所がハイライト表示され、修正しなければいけない個所が CAD モデリング段階で確認できる。

Table 9-4 Example of digitalized rule (Distance between hole and bend).

Order	Function Name	Input				Output	
		1	2	3	4	1	2
1	Hole	All	100.0	0.0	Solid	Out11	-
2	Fillet	All	100.0	0.0	-	Out21	-
3	Distance	Face and Face	Out11	Out21	All Combinations	Out31	Out32
4	Judgement	under	Out31	3.0	Out32	-	-

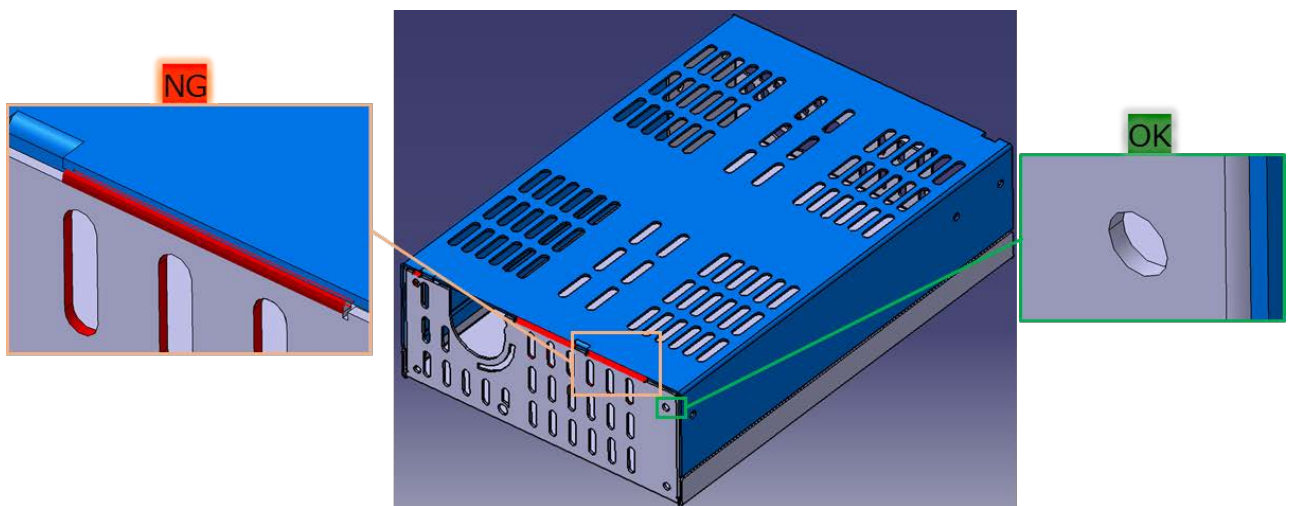


Fig. 9-3 Application result of distance between hole and bend rule.

9.4 設計ルールの実装事例

9.4.1 射出成形部品の最小角 R の半径

射出成型部品は、その金型の切削加工時の切削刃の保全性の観点から、曲率半径が Xmm 以上であることが望ましい。これは Xmm 以下にすると、 $\phi 2X\text{mm}$ 以下の細い切削刃を用いなければならず、折れやすくなるなどの不具合が起るためである。また、金型の上型と下型の合わせ部(以降、パーティングラインと呼ぶ)の曲率半径に関しては、切削が不要であるので、本ルールによるチェックは不要である。ここで、Xmm は導入している加工機等により決まり、またパーティングライン

の指定方法も各社個別に運用ルールを定めてモデリングしているのです。このような設計ルールは各社個別の設計ルールとなる。なお、本例では $X=1.0\text{mm}$ として説明する。

Table 9-5 に本設計ルールのデジタルイズドルールを示す。

手順 1 : 全体からパーティングライン(Out11)を検索する

手順 2 : パーティングラインと隣接する(距離が 0.0mm)面(Out21)を検索する

手順 3 : 全体からパーティングライン隣接面(Out21)を除外した面(Out31)を取得する

手順 4 : 手順 3 で取得した面に対して最大主曲率を測定する

判定 : 最大主曲率が 1.0 未満の面をハイライトする

この設計ルールを自動車のドアスイッチカバー部品を模擬したデータに対して実行し、3D-CAD 上で表示した結果を Fig. 9-4 に示す。このように、違反箇所がハイライトされ、修正しなければならない箇所が CAD モデリング段階で確認できる。

Table 9-5 Digitalized rule (Minimum fillet radius for injection mold).

Order	Function Name	Input				Output	
		1	2	3	4	1	2
1	Attribute	All	Partingline	-	-	Out11	-
2	Neighboring	All	Out11	0.0	Face	Out21	-
3	Set operation	Difference	Face	All	Out21	Out31	-
4	Curvature	Face	Out31	Max	-	Out41	-
5	Judgement	under	Out41	1.0	Out31	-	-

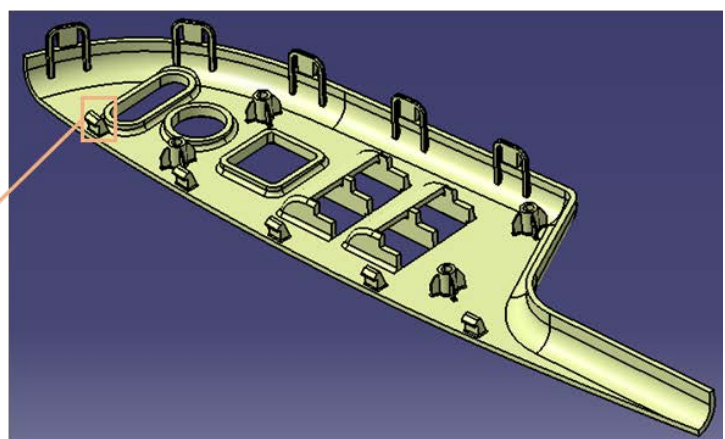
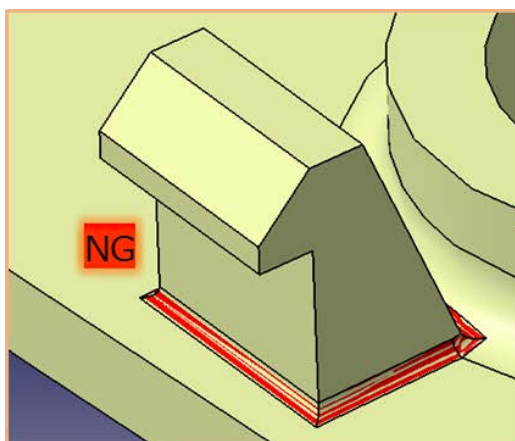


Fig. 9-4 Application result of minimum fillet radius for injection mold.

9.4.2 アーク溶接長

アーク溶接は溶接強度の確保や変形防止の観点から、ビード長が一定範囲内に入っていることが望ましい。また、この範囲は板厚に応じて定義される。これは、ビード長が短いと溶接強度が不足し、長いと入熱量が多くなり、反りの原因となるためである。Table 9-6 に本設計ルール of デジタルイズドルールを示す。

手順 1：全体からアーク溶接線(Out11)を検索する

手順 2：アーク溶接線近くの面を検索(Out21)する

手順 3：アーク溶接近くの面(Out21)の板厚(Out31)を計算する

手順 4：アーク溶接線の長さ(Out11)を計算する

手順 5：板厚-溶接長範囲テーブルを参照して、板厚(Out31)から溶接長範囲(Out51)を取得する

(本例で用いた板厚-溶接長範囲テーブルの値を Table 9-7 に示す)

判定：溶接長が溶接長範囲外の溶接線をハイライトする

この設計ルールをシャシー形状を模擬したデータに対して実行し、3D-CAD 上で表示した結果を Fig. 9-5 に示す。このように、違反箇所がハイライトされ、修正しなければいけない個所が CAD モデリング段階で確認できる。

Table 9-6 Length of arc welding line.

Order	Function Name	Input				Output	
		1	2	3	4	1	2
1	Attribute	All	ArcWeldLine	-	-	Out11	-
2	Neighboring	All	Out11	0.0	Face	Out21	-
3	Thickness	Out21	Min	-	-	Out31	-
4	Length	Out11	-	-	-	Out41	-
5	Table Reference	Range_Table	Out31	-	-	Out51	-
6	Judgement	Range	Out41	Out51	Out11	-	-

Table 9-7 Thickness - welding line length range table.

sign	Thickness	Length range
<	4.0	30.0, 60.0
	OTHER	40.0, 80.0

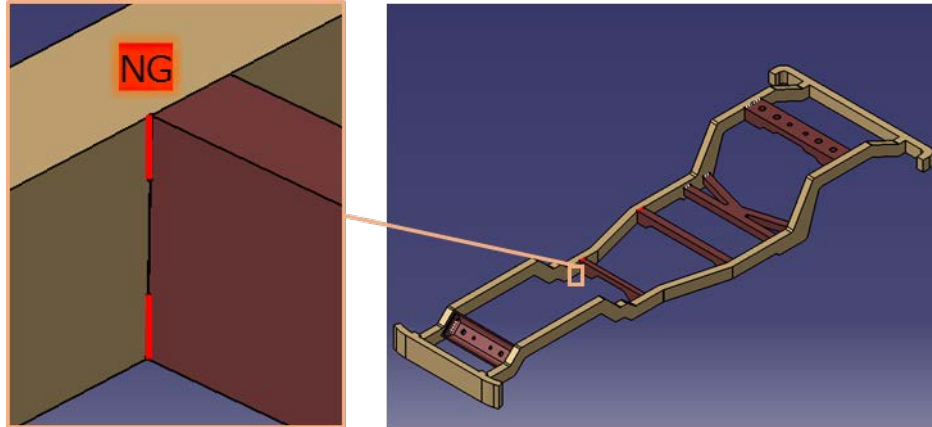


Fig. 9-5 Application result of arc welding line length.

9.5 今後の展望

設計ルールを CAE 結果や試作・試験結果から自動的に抽出する技術が設計力・モノづくり力の強化に必要になると考えている。

また、このような不具合の抑制だけではなく、人々の感性に訴える魅力的な製品を設計するために、感性の定量化手法の開発、および定量値データに基づく設計ルール化が必要になってくる。感性の定量化手法はその対象により様々な提案がなされている。この感性を CAE で評価する取り組みが進展していくと考えられる。たとえば、音の評価などは 2010 年頃から研究がなされている(柳澤他, 2012)。また、自動車の組み立て時にスナップフィットが「カチッ」とはまる音を再現し、どのような音がなればしっかりはまっているか、ということが CAE と人工知能の融合により可能になってきている(日立評論, 2019)。今後は、たとえば振動による乗り心地評価や光による見栄えの評価などが進展行くものと考えている。特にメッシュモーフィング技術では、自由に構造を変形できる技術であり、デザイン性・意匠性の追求に向いている。一方で、デザイン性に優れていても、製造できないものや品質の悪いものを設計してはいけないので、CAE 活用や本章で述べた設計ルールチェックが必要になってくると考えており、本メッシュ生成技術の適用範囲が広がることを期待する。

謝辞

本研究を進めるにあたり終始あたたかいご指導と激励を賜りました埼玉大学 綿貫啓一教授に心から感謝の意を表します。

埼玉大学 長嶺 拓夫教授，高崎 正也教授，楓 和憲准教授には，本論文作成に当たり，副査としてご助言を賜りました。深く感謝いたします。村松 慶一助教には，研究に関して多大なるご指導を頂きました。感謝申し上げます。

早稲田大学 田中 英一郎教授には，埼玉大学へ社会人ドクターとして入学するきっかけを頂き，また入学前に業績のまとめ方などのご指導を頂きました。深く感謝いたします。

共同研究者である，日立製作所 西垣 一郎様，針谷 昌幸様，廣 喜充様，後藤 康祐様，金剛 力様，新谷 政樹様，何 祺様には研究に関するご指導，開発技術のソフトウェアへの実装，各種検証などを実施して頂き，感謝の意を表します。

参考文献

- Ali, G., Hamid, R. Z., Mohammad, T. A., Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled end-capped conical tubes, *Thin-Walled Structures*, Vol. 49, Issue 10 (2011), pp.1312-1319
- Armstrong, C. G., Robinson, D. J., McKeag, R. M., Li, T. S., Bridgett, S. J., Donaghy, R. J. and McGleenan, C. A., Medials for meshing and more, In 4th International Meshing Roundtable (1995), pp. 277-288.
- Attene, M., Marini, S., Spagnuolo, M. and Falcidieno, B., The fast reject schema for part-in-whole 3D shape matching, *Proceedings of the 3rd Eurographics conference on 3D Object Retrieval* (2010), pp. 23-30.
- B. M. Klingner and J. R. Shewchuk, Aggressive Tetrahedral Mesh Improvement, *Proceedings of the 16th International Meshing Roundtable* (2007), pp.3-23
- Biasotti, S., Marini, S., Spagnuolo, M. and Falcidieno, B., Sub-part correspondence by structural descriptors of 3D shapes, *Computer-Aided Design*, Vol.38, No.9 (2006), pp. 1002-1019.
- Cordella, L. P., Foggia, P., Sansone, C. and Vento, M., An improved algorithm for matching large graphs, *Proceedings of the 3rd Technical Committee #15 of the International Association for Pattern Recognition Workshop on Graph-based Representations in Pattern Recognition* (2001), pp. 149-159.
- D. Marshall, Robust Segmentation of Primitives from Range Data in the Presence of Geometric Degeneracy, *IEEE TRANSACTION OF PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE*, Vol.23, No.3 (2001), pp.304-314.
- d'Ippolito, R., Tabak, U., De Munck, M., Donders, S., Moens, D. and Vandepitte, D., Modelling of a vehicle windshield with realistic uncertainty, *Proceedings of ISMA* (2006), pp. 2023-2032.
- Donaghy, R. J., Cune, W. M., Bridgett, S. J., Armstrong, C. G., Robinson, D. J., McKeag, R. M. and Robinson, D., Dimensional reduction of analysis models, *5th Intl Meshing Roundtable* (1996), pp. 307-320.
- El-Mehalawi, M. and Millerb, R, A database system of mechanical components based on geometric and topological similarity. Part I:representation, *Computer-Aided Design*, Vol.35, No.1(2003), pp. 83-94.
- Farouki, R. T., The approximation of non-degenerate offset surfaces, *Computer Aided Geometric Design*, Vol.3, No.1 (1986), pp. 15-43.
- Fleischmann, P. and Selberherr, S., Three dimensional delaunay mesh generation using a modified advancing front approach, *Proceedings of the 6th international Meshing Roundtable* (1997), pp. 267-278.
- Forsyth, M., Shelling and offsetting bodies, *Proceedings of the third ACM symposium on Solid modeling and applications* (1995), pp. 373-381.
- G. Shakhnarovich, T. Darrell and P. Indyk, *Nearest-Neighbor Methods in Learning and Vision: Theory and Practice*, The MIT Press, (2006)
- Gal, R., & Cohen-Or, D., Salient geometric features for partial shape matching and similarity, *ACM Transactions on Graphics*, Vol.25, No.1(2006), pp. 130-150.
- Gunn, T., G., The mechanization of design and manufacturing, *Scientific American*, Vol.247, No.3 (1982), pp. 114-30.
- H. Borouchaki, F. Hecht, E. Saltel and P. L. George, Reasonably Efficient Delaunay Based Mesh Generator in 3 Dimensions, *Proceedings 4th International Meshing Roundtable*, (1995), pp.3-14
- H. Date, S. Kanai, T. Kishinami, I. Nishigaki and T. Dohi, Mesh Quality Improvement based on Subdivision and Simplification, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol.71, No.2 (2005), pp.223-227
- Hidaka, N., Michikawa, T., Yabuki, N., Fukuda, T. and Motamedi, A., Creating product models from point cloud of civil structures based on geometric similarity, *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.40, No.4, pp.137-141.

針谷昌幸, “設計気づき支援システムの開発”, 第 25 回設計工学・システム部門講演会講演論文集(2012), pp.803-808.

A DEFINITIVE GUIDE TO DESIGN FOR MANUFACTURING SUCCESS, HCL technologies.

現場のデジタルライズ／異音点検の自動化, 日立評論, Vol. 101, No. 1 (2019).

Ito, Y., Shih, A. M., Erukala, A. K., Soni, B. K., Chernikov, A., Chrisochoides, N. P. and Nakahashi, K.,

Iyer, N., Jayanti, S., Lou, K., Kalyanaraman, Y. and Ramani, K., Three-dimensional shape searching: state-of-the-art review and future trends, Computer-Aided Design, Vol.37, No.5 (2005), pp. 509-530.

Ji, Z., Liu, L. and Wang, G., A global laplacian smoothing approach with feature preservation, Ninth International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphics (2005).

笠原皓司, 線形代数学, サイエンス・ライブラリ (1982), pp. 168-177.

片岡一朗, メッシュ生成・CAE 研究部会 (研究部会だより), 応用数理, Vol.21, No.1 (2011), pp.64.

Kirkpatrick, S. W., Development and validation of high fidelity vehicle crash simulation models. No. 2000-01-0627. SAE Technical Paper, (2000).

Konno, H, An algorithm for solving bilinear knapsack problems, Journal of the Operations Research Society of Japan, Vol. 24, No. 4 (1981), pp.360-374.

河野勝人, 朝日龍介, 杉本繁, 上野正樹, 小島宏介, 花田裕, 衝突安全開発における CAE の進化, マツダ技報, No.32 (2012), pp. 151-155.

Li, J., Yang, L., Zhong, Y. E. and Xie, C., The Algebraic-Hyperbolic Polynomial Ferguson Curve and Coons Patch, Communications and Information Processing (2012), pp. 359-367.

Liu, C., Song, X. and Wang, J., Simulation Analysis of Car Front Collision Based on LS-DYNA and Hyper Works, Journal of Transportation Technologies, Vol. 4, (2014), pp. 337-342.

m マイナビニュース, 多様化するニーズに対応するために, トヨタが実行する性能開発工程の効率化, <https://news.mynavi.jp/article/20140924-altair-toyota-exa/> (参照日 2019 年 11 月 30 日)

Nelson, D, Design for X. In The Innovation Tools Handbook, Volume 2 (2016), pp. 93-104.

Ohbuchi, R., Minamitani, T. and Takei, T., Shape Similarity Search of 3D Models by using Enhanced Shape Functions, Proceedings of the Theory and Practice of Computer Graphics, (2003), pp. 97-104.

大西行雄, スプライン法を用いた 2 次元補間について. 日本海洋学会誌, Vol. 31, No. 6 (1975), pp.259-264.

Osada, R., Funkhouser, T., Chazelle, B. and Dobkin, D., Shape distributions, ACM Transactions on Graphics, Vol.21, No.4 (2002), pp. 807-832.

小野寺誠, 板林勇気, 片山絵里香, 金剛力, 新谷政樹, 川本啓輝, 亀井章, 倉田剛, 安部剛史, 綿貫啓一, 多種多様な設計ルールを三次元 CAD 上で自動検証可能な気づき支援 CAD システムの開発, 日本機械学会 第 29 回設計工学・システム部門講演会講演論文集 (2019), 2305.

小野寺誠, 針谷昌幸, 金剛力, 新谷政樹, 何祺, 類似部分形状検索を用いた解析モデル再利用型メッシュ自動生成技術の開発, 日本機械学会論文集, Vol. 83, No. 853 (2017), DOI:10.1299/transjsme.17-00073.

小野寺誠, 西垣一朗, CAD-CAE 連携のための中立面自動生成技術, 日本計算工学会論文集, Vol.4, (2002), 9-14.

小野寺誠, 針谷昌幸, 廣喜充, 金剛力, 新谷政樹, 境界表現 3D-CAD モデルを対象とした類似部分形状認識技術の開発, 日本機械学会第 25 回設計工学・システム部門講演会 (2015).

Parallel unstructured mesh generation by an advancing front method, Mathematics and Computers in Simulation, Vol.75, No.5 (2007), pp. 200-209.

- Piegl, L. A. and Tiller, W., Computing offsets of NURBS curves and surfaces, *Computer-Aided Design*, Vol.31, No.2 (1999), pp. 147-156.
- Sheehy, D. J., Armstrong, C. G. and Robinson, D. J, Computing the medial surface of a solid from a domain Delaunay triangulation, In *Proceedings of the third ACM symposium on Solid modeling and applications* (1995), pp. 201-212.
- Shephard, M.S., F. Guerinoni, J.E. Flaherty, R.A. Ludwig and P.L. Baehmann, Finite Octree Mesh Generation for Three-Dimensional Flow Analysis, *Numerical Grid Generation in Computational Fluid Mechanics`88*, (1988), pp.709-718
- Sorkine, O., Cohen-Or, D., Lipman, Y., Alexa, M., Rössl, C. and Seidel, H. P., Laplacian surface editing, *Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing* (2004), pp. 175-184).
- 坂本茂, シミュレーションと最適化技術: 総論, *日本 AEM 学会誌*, Vol.22, No.1 (2014), pp.1-6.
- Ullman, D. G., Wood, S. and Craig, D., The importance of drawing in the mechanical design process, *Computers & graphics*, Vol.14, No.2 (1990), pp. 263-274.
- Ullmann, J. R., An algorithm for subgraph isomorphism, *Journal of the Association for Computing Machinery*, Vol.23, No.1 (1976), pp.31-42.
- Van der Auweraer, H., Van Langenhove, T., Brughmans, M., Bosmans, I., El Masri, N. and Donders, S, Application of mesh morphing technology in the concept phase of vehicle development, *International journal of vehicle design*, Vol.43 No.1(2006), pp. 281-305.
- Vollmer, J., Mencl, R. and Mueller, H, Improved laplacian smoothing of noisy surface meshes, *Computer graphics forum*, Vol. 18, No. 3 (1999), pp. 131-138.
- Wu, D., Rosen, D. W., Wang, L. and Schaefer, D. Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation. *Computer-Aided Design*, 59(2015), 1-14.
- Y. Ito, A. Shih and B. Soni, Reliable Isotropic Tetrahedral Mesh Generation Based on an Advancing Front Method, *Proceedings of the 13th International Meshing Roundtable*, (2004), pp.95-105.
- Yoon, S. H., Kim, M. S., Sweep - based freeform deformations, *Computer Graphics Forum*, Vol. 25, No. 3 (2006), pp. 487-496.
- 山内雄太, 道川隆士, 鈴木宏正, 大田栄二, 橋間正芳, 佐藤裕一, CAD メッシュの局所類似形状検索に関する研究, *精密工学会学術講演会講演論文集* (2011), pp. 293-294.
- 柳澤 秀吉, 横尾 俊輔, 村上 存, 大富 浩一, 穂坂 倫佳, 製品音の感性設計における和音性特徴量の効果 (クリーナの定常音を事例として) , *日本機械学会論文集C編*, Vol. 78 (2012), No. 787, pp. 921-927.
- You, C. and Tsai, Y., 3D solid model retrieval for engineering reuse based on local feature correspondence, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.46 (2009), pp. 649-661.